9 789533 041056

Stephen Hawking

TEORIJA SVEGA

Podrijetlo i sudbina svemira

Stephen Hawking
Teorija svega

v|b|z ZAGREB

v|b|z

biblioteka
STRUČNO
POPULARNA

izvršna urednica:
Sandra Ukalović

Stephen Hawking
Teorija svega

izdavač:
V.B.Z. d.o.o.
10010 Zagreb, Dračevička 12
tel: 01/6235-419, fax: 01/6235-418
e-mail: info@vbz.hr
www.vbz.hr

za izdavača:
Boško Zatezalo

urednik knjige:
Bruno Šimleša

lektura i korektura:
Tina Horvat

grafička priprema:
V.B.Z. studio, Zagreb

tisak:
Impress d.d. Ivančna Gorica, Slovenija
rujan 2009.

Stephen Hawking

Teorija svega

Podrijetlo i sudbina svemira

s engleskoga prevela:
Andrea Marić

v|b|z ZAGREB
2009.

v|b|z biblioteka
STRUČNO
POPULARNA

naslov izvornika:

Stephen Hawking
THE THEORY OF EVERYTHING

Original English language edition published by
Phoenix Books and Audio.
copyright © 2008 by Phoenix Books and Media.
All rights reserved

Copyright © 2009. za hrvatsko izdanje:
V.B.Z. d.o.o.
Zagreb

CIP zapis dostupan u računalnom katalogu
Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu
pod brojem 713028.

ISBN: 978-953-304-105-6 (tvrdi uvez)

Iz svojih nas je kolica poveo na putovanje do najudaljenijih i najčudnijih kutaka svemira te time razbuktao našu maštu i pokazao moć ljudskog duha!

Barack Obama o Stephenu Hawkingu

sadržaj:

9 **Uvod**

11 Prvo predavanje
Ideje o svemiru

21 Drugo predavanje
Svemir koji se širi

39 Treće predavanje
Crne rupe

57 Četvrto predavanje
Crne rupe nisu tako crne

73 Peto predavanje
Podrijetlo i sudbina svemira

93 Šesto predavanje
Smjer vremena

105 Sedmo predavanje
Teorija svega

121 **Kazalo**

Uvod

Ovom serijom predavanja pokušat ću vam prikazati skicu onoga što smatramo poviješću svemira, od Velikog praska do crnih rupa. U prvom predavanju dat ću kratki pregled ranijih ideja o svemiru te pokazati kako smo došli do svoje sadašnje predodžbe o njemu. To bismo mogli nazvati poviješću povijesti svemira.

U drugom predavanju opisat ću kako su i Newtonove i Einsteinove teorije gravitacije dovele do zaključka da svemir ne može biti statičan; on se mora ili širiti ili skupljati. To, pak, implicira kako je moralo postojati vrijeme, u razdoblju između deset ili dvadeset milijardi godina unatrag, kada je gustoća svemira bila beskonačna. To zovemo Velikim praskom. Bio bi to početak svemira.

U trećem predavanju govorit ću o crnim rupama. One nastaju kad masivna zvijezda ili neko još veće tijelo kolabira u samo sebe, pod pritiskom vlastite gravitacijske sile. Prema Einsteinovoj općoj teoriji relativnosti, svatko tko bi bio dovoljno lud da upadne u crnu rupu bio bi zauvijek izgubljen. Nikad se više ne bi mogao vratiti iz nje. Umjesto toga, povijest bi, barem što se te osobe tiče, doživjela svoj neugodni kraj u singularnosti. Ipak, opća relativnost je klasična teorija – to znači, ne uzima u obzir načelo neodređenosti kvantne mehanike.

U četvrtom predavanju opisat ću kako kvantna mehanika dopušta curenje energije iz crnih rupa. Crne rupe ipak nisu toliko crne kako su ih prikazali.

U petom predavanju primijenit ću ideje iz kvantne mehanike na Veliki prasak i podrijetlo svemira. To vodi do ideje da prostor-vrijeme može biti konačno u protežnosti, ali bez ruba ili granice. Bilo bi to nešto poput površine Zemlje, samo s još dvije dodatne dimenzije.

U šestom predavanju pokazat ću kako taj novi prijedlog o granici može objasniti zašto je povijest toliko drukčija od budućnosti, iako su zakoni fizike vremenski simetrični.

Na kraju, u sedmom predavanju, opisat ću kako pokušavamo pronaći jedinstvenu teoriju koja će uključiti kvantnu mehaniku, gravitaciju i sve druge interakcije fizike. Ako u tome uspijemo, zaista ćemo razumjeti svemir i svoje mjesto u njemu.

Prvo predavanje
Ideje o svemiru

01.

Još tamo davno, oko 340. godine prije Krista, Aristotel je u svojoj knjizi *O nebesima* iznio dva dobra dokaza za vjerovanje da je Zemlja prije okrugla kao lopta nego ravna poput ploče. Prvo, shvatio je da su eklipse Mjeseca uzrokovane Zemljinim prolascima između Sunca i Mjeseca. Zemljina je sjena na Mjesecu uvijek okrugla, što je moguće samo ako je Zemlja sferičnog oblika. Da je Zemlja plosnata poput diska, sjena bi bila izduljena i eliptična, osim u slučaju da se eklipsa uvijek javlja u vrijeme kada je Sunce točno iznad središta diska.

Drugo, Grci su zbog svojih putovanja znali da se Sjevernjača pojavljuje niže na horizontu kad je promatramo s juga, nego onda kad je promatramo iz sjevernijih područja. Zbog razlike u položaju koji Sjevernjača zauzima u Egiptu i Grčkoj, Aristotel čak navodi i procjenu da duljina puta oko Zemlje iznosi 400.000 stadija. Nije poznato koja je točno duljina stadija, ali mogla bi iznositi nešto manje od 200 metara. To bi Aristotelovu procjenu činilo otprilike dvostruko većom od trenutačno prihvaćene brojke.

Grci su imali čak i treći dokaz da je Zemlja okrugla, jer iz kojeg bi se drugog razloga najprije vidjelo jedro broda na morskom horizontu, a tek potom i trup? Aristotel je mislio da Zemlja miruje i da se Sunce, Mjesec, planeti i zvijezde kreću u kružnim orbitama oko Zemlje. To je vjerovao jer je, iz nepoznatih razloga, osjećao kako je Zemlja središte svemira, a kružno gibanje najsavršenije.

Tu je ideju u 1. stoljeću naše ere Ptolomej razradio u cjelovit kozmološki model. Zemlja stoji u središtu, okružena s osam sfera koje nose Mjesec, Sunce, zvijezde i pet u to vrijeme poznatih planeta: Merkur, Veneru, Mars, Jupiter i Saturn. Kako bi se mogle objasniti njihove, kako je uočeno, prilično komplicirane putanje nebom, sami planeti kreću se manjim kružnim putanjama vezanim uz pripadajuće im sfere. Vanjska sfera nosila je takozvane zvijezde stajaćice, koje su, jedne u odnosu na druge, uvijek ostajale na istim položajima, ali su sve zajedno kružile nebom. O tome što se nalazi s onu stranu posljednje sfere nikad se i nije jasno govorilo, no to u svakom slučaju nije bilo dijelom čovjeku vidljivog svemira.

Ptolomejev model pružao je dovoljno točan sustav predviđanja pozicija uočljivih nebeskih tijela. No, kako bi te pozicije točno predvidio, Ptolomej je morao pretpostaviti da Mjesec slijedi putanju koja ga katkad dovodi dvostruko bliže Zemlji nego inače. A to je značilo da bi nam se Mjesec katkad morao činiti dvostruko većim nego obično. Ptolomej je bio svjestan te manjkavosti, no ipak je njegov model bio općenito, iako ne univerzalno, prihvaćen. I Crkva ga je prihvatila kao sliku svemira koja je u skladu sa Svetim pismom. Imala je tu veliku prednost da s onu stranu sfere zvijezda stajaćica ostavlja mnogo prostora za raj i pakao.

Mnogo jednostavniji model, međutim, predložio je 1514. godine poljski svećenik Nikola Kopernik. Isprva je, zbog straha da će biti optužen za herezu, anonimno objavio svoj model. Njegova je ideja bila da Sunce stoji u središtu, a da se Zemlja i ostali planeti kreću oko njega u kružnim orbitama. Nesrećom za Kopernika, prošlo je gotovo čitavo stoljeće prije no što je netko tu ideju shvatio ozbiljno. Tada su dva astronoma – Nijemac Johannes Kepler i Talijan Galileo Galilei – počeli javno podržavati Kopernikovu

teoriju, unatoč tome što se orbite koje ona predviđa nisu u potpunosti poklapale s uočenim putanjama.

Smrt aristotelijansko-ptolomejske teorije nastupila je 1609. Te je godine Galileo počeo promatrati noćno nebo teleskopom, koji je tada izumljen.

Dok je gledao u planet Jupiter, Galileo je otkrio kako ga prati nekoliko manjih satelita ili mjeseca, koji se kreću kružnim putanjama oko njega. To je značilo da se ne mora baš sve kretati izravnom kružnom putanjom oko Zemlje, kako su mislili Aristotel i Ptolomej. I dalje je, naravno, bilo moguće vjerovati kako je Zemlja nepomična u središtu svemira, a da se Jupiterovi mjeseci kreću nekim izuzetno kompliciranim putanjama oko Zemlje, koje samo naizgled kruže oko Jupitera. Međutim, Kopernikova teorija je bila znatno jednostavnija.

Tada je Kepler modificirao Kopernikovu teoriju, iznoseći ideju da se planeti kreću ne u kružnim putanjama, nego u elipsama. Predviđanja su se sada konačno poklapala s promatranjima. Što se Keplera ticalo, eliptične putanje bile su tek *ad hoc* hipoteza – k tome i prilično proturječna jer su elipse bile očito manje savršene od kružnica. Otkrivši, gotovo slučajno, da se eliptične putanje dobro uklapaju u promatranja, nije se više mogao pomiriti s vlastitom idejom prema kojoj magnetne sile tjeraju planete na kruženje oko Sunca.

Objašnjenje je uslijedilo tek mnogo kasnije, 1687. godine, kada je Newton objavio svoje *Principia Mathematica Naturalis Causae*. Bio je to vjerojatno najvažniji pojedinačni rad ikad objavljen iz područja fizike. U njemu, Newton ne samo da iznosi teoriju kretanja tijela u prostoru i vremenu, nego razvija i matematiku nužnu za analiziranje tih kretanja. K tome, Newton postulira zakon opće gravitacije. On govori da svako tijelo u svemiru prema drugim tijelima privlači sila koja je tim jača što su tijela masivnija i bliža

jedna drugima. To je ista ona sila koja tjera predmete da padaju na tlo. Priča prema kojoj je Newtonu jabuka pala na glavu gotovo je sigurno apokrifna. Sve što je sâm Newton ikad o tome rekao jest da mu je ideja o gravitaciji nadošla dok je sjedio u kontemplativnom raspoloženju, pa je tome naknadno pridodana priča o jabuci koja pada.

Newton je pokazao i kako, prema njegovu zakonu, gravitacija uzrokuje kretanje Mjeseca eliptičnom putanjom oko Zemlje, kao što uzrokuje i kretanje Zemlje i planeta eliptičnim putanjama oko Sunca. Kopernikanski model riješio se Ptolomejevih nebeskih sfera, a s njima i ideje da svemir ima prirodnu granicu. Zvijezde stajaćice nisu naizgled mijenjale svoje relativne položaje dok se Zemlja kreće oko Sunca. Stoga je bilo prirodno pretpostaviti kako su zvijezde stajaćice objekti nalik na naše Sunce, samo što su mnogo udaljenije. To je stvorilo problem. Newton je shvaćao da bi se, prema njegovoj teoriji gravitacije, zvijezde trebale međusobno privlačiti; prema tome, činilo se kako ne mogu ostati temeljno nepomične. Zar neće u nekom trenutku sve pasti jedne na druge?

U pismu napisanom 1691. godine Richardu Bentleyju, drugom vodećem misliocu svog vremena, Newton polemizira kako bi se to svakako i dogodilo kad bi postojao samo konačan broj zvijezda. Ali objašnjava da ako, s druge strane, postoji beskrajan broj zvijezda raspoređenih manje ili više podjednako u beskrajnom prostoru, to se ne može dogoditi jer ne postoji nikakva središnja točka u koju bi zvijezde pale. Taj dokaz je primjer zamki s kojima se čovjek suočava kad govori o beskonačnosti.

U beskonačnom svemiru, svaka točka mogla bi se smatrati središnjom jer se oko nje sa svih strana nalazi beskonačan broj zvijezda. Ispravan je pristup, kako se tek mnogo kasnije shvatilo, kao konačnu situaciju razmatrati upravo onu u kojoj sve zvijezde padaju jedne na druge. Onda

se možemo pitati što se mijenja ako dodamo još zvijezda, ugrubo podjednako raspoređenih, izvan te regije svemira. Prema Newtonovu zakonu, dodatne zvijezde ne bi činile nikakvu razliku u odnosu na one izvorne, pa bi zvijezde padale jednakom brzinom. Možemo dodati zvijezda koliko god hoćemo, ali one bi i dalje kolabirale same u sebe. Mi sada znamo da je nemoguće imati beskrajan statički model svemira u kojem je gravitacija uvijek privlačna.

O općoj klimi mišljenja prije 20. stoljeća ponešto nam govori i činjenica da nitko do tada nije pretpostavio da se svemir širi ili skuplja. Bilo je općenito prihvaćeno da svemir ili oduvijek postoji u nepromjenjivom stanju ili da je bio stvoren u određenom vremenu u prošlosti, više ili manje takav kakvim ga i mi danas vidimo. Jednim je dijelom tako bilo možda i zbog sklonosti čovjeka da vjeruje u vječne istine, koliko i radi utjehe koju nalazi u pomisli da će, čak i ako on možda ostari i umre, svemir ostati nepromijenjen.

No, čak ni oni koji su shvaćali kako Newtonova teorija gravitacije pokazuje da svemir ne može biti statičan, nisu ni pomišljali sugerirati da se on možda širi.

Umjesto toga, pokušavali su prilagoditi teoriju čineći gravitacijsku silu odbojnom na veoma velikim udaljenostima. To nije znatno utjecalo na njihova predviđanja kretanja planeta. Ali dopuštalo je da zvijezde, raspodijeljene u beskonačnosti, ostanu u ravnoteži, jer su privlačne sile između bližih zvijezda bivale uravnotežene odbojnim silama među onim udaljenijima.

Međutim, mi danas vjerujemo da bi takva ravnoteža bila nestabilna. Ako se zvijezde u nekom području samo malo približe jedne drugima, privlačne sile među njima postale bi jače i prevladale bi nad odbojnim silama. To bi značilo da bi zvijezde nastavile padati jedne prema drugima. S druge

strane, ako se zvijezde samo malo udalje jedne od drugih, odbojne sile će ojačati i međusobno ih još više udaljiti.

Još jedan prigovor beskrajnom statičkom svemiru obično se pripisuje njemačkom filozofu Heinrichu Olbersu. U stvari, razni Newtonovi suvremenici bili su svjesni problema, pa Olbersov članak iz 1823. godine čak i nije bio prvi koji je sadržao prihvatljive prigovore na tu temu. Bio je ipak prvi koji je bio naširoko primijećen. Problem je u tome što bi u beskrajnom statičnom svemiru gotovo svaka linija ili krak završili na površini zvijezde. Tako bi se moralo očekivati da u konačnici čitavo nebo, čak i noću, bude blistavo poput Sunca. Olbersov protuargument glasio je da svjetlost s udaljenih zvijezda prigušuje materija na koju putem nailazi. Međutim, da je tako, ta bi se materija na kraju zagrijala do te mjere da bi i ona blistala poput zvijezda.

Jedini način da se izbjegne zaključak prema kojem bi čitavo noćno nebo moralo biti blistavo poput površine Sunca bio bi taj da zvijezde ne sjaje oduvijek, nego su se upalile u nekom određenom trenutku u prošlosti. U tom slučaju, apsorbirajuća materija možda se još nije zagrijala, ili svjetlost udaljenih zvijezda možda još nije stigla do nas. A to nas dovodi do pitanja što je moglo prouzročiti da se zvijezde uopće upale.

Početak svemira

O početku svemira se, naravno, već dugo govori. Prema određenom broju ranih kozmologija iz židovske, kršćanske ili muslimanske tradicije, svemir je počeo postojati prije određenog i ne tako davnog vremena. Jedan od argumenata u prilog takvom početku bio je osjećaj da je nužno imati početni uzrok kojim bi se objasnilo postojanje svemira.

Drugi je argument predložio sv. Augustin u svojoj knjizi *Božji grad*. On ističe da civilizacija napreduje, i mi se sjećamo

tko je zaslužan za određeni napredak ili je razvio određenu tehnologiju. Prema tome ni čovjek, a tako vjerojatno niti svemir, nisu mogli biti tu čitavo vrijeme. U suprotnom bismo napredovali više nego što je to slučaj.

Kao doba stvaranja svemira, sveti Augustin je prihvaćao vrijeme oko 5000. godine prije Krista, u skladu s Knjigom postanka. Zanimljivo je spomenuti kako to vrijeme nije veoma udaljeno od kraja zadnjeg Ledenog doba, oko 10.000 godina prije Krista, kad je civilizacija zaista započela. Aristotelu i većini drugih grčkih filozofa, s druge strane, nije se osobito sviđala zamisao o stvaranju jer je zahtijevala previše božanske intervencije. Oni su stoga vjerovali da ljudska vrsta i svijet postoje, i postojat će, zauvijek. Oni već jesu razmotrili argument o napretku, opisan maloprije, i na njega odgovorili govoreći da su se povremeno događale poplave ili druge katastrofe koje bi svaki put iznova vratile ljudsku rasu natrag na početak civilizacije.

Dok je većina ljudi vjerovala u esencijalno statičan i nepromjenjiv svemir, pitanje o tome je li on imao početak zaista je pripadalo metafizici ili teologiji. U jednom i u drugom slučaju, čovjek se mogao pouzdati u ono vidljivo. Ili je svemir postojao oduvijek, ili je pokrenut u nekom određenom trenutku u vremenu, ali na takav način da se čini kao da doista postoji oduvijek. No, 1929. godine Edwin Hubble iznio je ključno zapažanje da se udaljene zvijezde, kamo god pogledali, kreću brzo u smjeru od nas. Drugim riječima, svemir se širi. To znači da su u ranija vremena objekti morali biti bliže jedni drugima. U stvari, činilo se kako je postojalo vrijeme, prije nekih deset ili dvadeset tisuća miljuna godina, kada su svi objekti bili doslovno na istom mjestu.

To je otkriće pitanje o početku svemira konačno dovelo u područje znanosti. Hubbleova opažanja sugerirala su kako je postojalo vrijeme zvano Veliki prasak, kada je svemir

bio infinitezimalno malen i, prema tome, beskonačno gust. Ako su tome vremenu i prethodili neki događaji, oni ionako ne bi mogli imati utjecaja na ono što se zbiva u sadašnjosti. Njihovo postojanje može se ignorirati jer ne bi imalo uočljive posljedice.

Moglo bi se reći kako je vrijeme započelo s Velikim praskom, u smislu da ranija vremena naprosto ne možemo definirati. Valja naglasiti da je taj početak u vremenu veoma različit od onoga o kojem se razmišljalo prije toga. U nepromjenjivom svemiru, početak u vremenu je nešto što je moralo uvesti neko biće koje se nalazi izvan svemira. Nema fizičke nužnosti za početak. Moguće je zamisliti da je Bog stvorio svemir u doslovno bilo kojem trenutku u prošlosti. S druge strane, ako se svemir širi, možda postoje fizički razlozi za postojanje početka. I dalje se može vjerovati da je Bog stvorio svemir u trenutku Velikog praska. Mogao ga je stvoriti i kasnije, ali tako da izgleda kao da je postojao Veliki prasak. No bilo bi besmisleno pretpostaviti da je stvoren prije Velikog praska. Svemir koji se širi ne isključuje Tvorca, ali postavlja ograničenja u pogledu toga kada je On mogao obaviti taj posao.

Drugo predavanje
Svemir koji se širi

02.

Naše Sunce i obližnje zvijezde dio su nepregledne nakupine zvijezda, galaksije zvane Mliječna staza. Dugo vremena mislilo se kako je to čitav svemir. Tek 1924. godine američki astronom Edwin Hubble pokazao je da naša galaksija nije jedina. U stvari, postoje mnoge galaksije s golemim prostranstvima praznoga prostora između njih. Kako bi to dokazao, on je morao odrediti udaljenosti do tih drugih galaksija. Možemo odrediti udaljenost bližih zvijezda promatrajući kako mijenjaju položaj dok se Zemlja kreće oko Sunca. Ali druge galaksije su, za razliku od bližih zvijezda, toliko daleko da nam se doista čine nepomičnima. Hubble je bio prisiljen, stoga, koristiti indirektne metode mjerenja udaljenosti.

Treba, dakle, znati da vidljiva svjetlost zvijezde ovisi o dva faktora – o luminiscenciji i udaljenosti od nas. Kad je riječ o bližim zvijezdama, možemo mjeriti i njihovu vidljivu svjetlost i njihovu udaljenost, pa im možemo izračunati luminiscenciju. Isto tako, ako nam je poznata luminiscencija zvijezda iz drugih galaksija, možemo im izračunati udaljenost mjereći njihovu vidljivu svjetlost. Hubble je tvrdio da postoje neke vrste zvijezda koje uvijek imaju istu luminiscenciju u vrijeme kad su nam dovoljno blizu da obavimo mjerenja. Ako, dakle, pronađemo takve zvijezde u drugoj galaksiji, možemo pretpostaviti da imaju istu luminiscenciju. Tako možemo izračunati udaljenost

do te galaksije. Ako to uspijemo učiniti za veći broj zvijezda u istoj galaksiji, i naši izračuni uvijek pokazuju istu udaljenost, možemo se prilično pouzdati u svoju procjenu. Na taj je način Edwin Hubble izračunao udaljenosti do devet različitih galaksija.

Danas znamo da je naša galaksija samo jedna od nekih stotinu tisuća milijuna, koliko ih možemo vidjeti uz pomoć modernih teleskopa, a svaka od njih sadrži oko stotinu tisuća milijuna zvijezda. Mi živimo u galaksiji koja se proteže na prostoru od otprilike stotinu tisuća svjetlosnih godina i polako rotira; zvijezde u njezinim spiralnim krakovima naprave krug oko njezina središta otprilike jednom u stotinu milijuna godina. Naše Sunce je samo obična, prosječno velika žuta zvijezda, blizu vanjske granice jednog od spiralnih krakova. Sigurno je da smo daleko dospjeli od vremena Aristotela i Ptolomeja, kada smo mislili da je Zemlja središte svemira.

Zvijezde su tako daleko da nam se čine kao sitne točkice svjetla. Ne možemo odrediti njihovu veličinu ili oblik. Kako onda možemo razlikovati različite vrste zvijezda? U slučaju velike većine zvijezda, samo je jedna karakteristična odrednica koju možemo promatrati – boja njezina svjetla. Newton je otkrio da ako svjetlost Sunca prolazi kroz prizmu, ona se lomi na svoje sastavne boje – spektar – kao u dugi. Usmjeravajući teleskop na pojedinu zvijezdu ili galaksiju, možemo na sličan način uočiti spektar svjetla te zvijezde ili galaksije. Različite zvijezde imaju različite spektre, ali relativna blistavost različitih boja uvijek je točno onakva kakvu bismo i očekivali da ćemo pronaći u svjetlu koje emitira objekt crvenog sjaja. To znači da možemo odrediti temperaturu zvijezde prema spektru njezine svjetlosti. Dapače, otkrivamo da određene vrlo specifične boje nedostaju u spektrima zvijezda, a te nedostajuće boje mogu varirati od zvijezde

do zvijezde. Znamo da svaki kemijski element apsorbira karakterističnu kombinaciju točno određenih boja. Tako, uspoređujući svaku od boja koje nedostaju u zvijezdinu spektru, možemo odrediti koji su točno elementi prisutni u atmosferi zvijezde.

Dvadesetih godina prošlog stoljeća, kad su astronomi počeli promatrati spektre zvijezda u drugim galaksijama, otkrili su nešto doista neobično: prepoznali su iste karakteristične kombinacije nedostajućih boja kao i kod zvijezda u našoj vlastitoj galaksiji, ali one su sve bile pomaknute, u istoj relativnoj mjeri, prema crvenom kraju spektra. Jedino razumljivo objašnjenje bilo je da se galaksije udaljavaju od nas, pa je frekvencija svjetlosnih valova koji od njih dopiru smanjena, ili pomaknuta prema crvenom, zbog Dopplerova efekta. Poslušajte automobil dok prolazi cestom. Dok se približava, zvuk njegova motora je viši, što odgovara višoj frekvenciji zvučnih valova; a kada prođe i ode dalje, zvuči dublje. Ponašanje svjetlosnih ili radijalnih (zrakastih) valova je slično. Dapače, policija je iskoristila Dopplerov efekt kako bi mjerila brzinu automobila mjerenjem frekvencije pulseva radio valova koji se o njega odbijaju.

Tijekom godina koje su slijedile nakon njegova dokaza postojanja drugih galaksija, Hubble je provodio vrijeme katalogizirajući njihove udaljenosti i promatrajući njihove spektre. U to vrijeme većina je ljudi očekivala da se galaksije kreću prilično nasumično, pa su očekivali i da će naći jednako mnogo spektara s otklonom prema plavom, koliko i onih s otklonom prema crvenom kraju. Stoga je otkriće da sve galaksije imaju otklon prema crvenom spektru bilo poprilično iznenađenje. One se sve do jedne odmiču od nas. Još veće iznenađenje izazvalo je otkriće koje je Hubble predstavio 1929. godine: čak i mjera otklona galaksije prema crvenom nije slučajna, nego izravno proporcionalna njezinoj udaljenosti od nas. Ili, drugim

riječima, što je galaksija dalje, brže se udaljava od nas. A to je značilo da svemir ne može biti statičan, kako su svi prije mislili, nego se brzo širi. Udaljenost između različitih galaksija čitavo vrijeme se povećava.

Otkriće da se svemir širi predstavljalo je veliku intelektualnu revoluciju 20. stoljeća. Naknadno, bilo je lako čuditi se kako se toga nitko prije nije sjetio. Newton i drugi trebali su shvatiti da bi se statični svemir ubrzo počeo skupljati pod utjecajem gravitacije. Ali pretpostavimo da se svemir širi, umjesto da je statičan. Ako se širi relativno sporo, sila gravitacije uzrokovala bi da se na kraju prestane širiti i počne skupljati. Međutim, ako se širi brzinom većom od određene kritične granice, gravitacija nikad neće postati dovoljno jaka da zaustavi širenje i svemir će se nastaviti zauvijek širiti. To je pomalo kao ono što se događa kad netko ispali raketu okomito s površine Zemlje. Ako ona ima relativno malu brzinu, gravitacija će na kraju zaustaviti raketu i ona će početi padati natrag prema dolje. S druge strane, ako raketa ima brzinu veću od određene kritične granice – koju predstavlja brzina od oko 11,26 kilometara u sekundi – gravitacija neće biti dovoljno jaka da je povuče natrag, pa će se ona zauvijek nastaviti udaljavati od Zemlje.

Takvo ponašanje svemira moglo se predvidjeti iz Newtonove teorije gravitacije u bilo kojem trenutku tijekom 19., 18., ili čak i krajem 17. stoljeća. Ipak, vjerovanje u statični svemir bilo je toliko jako da je ustrajalo sve do ranog 20. stoljeća. Čak i kad je Einstein 1915. formulirao opću teoriju relativnosti, bio je siguran u to da svemir mora biti statičan. Stoga je, kako bi to bilo moguće, prilagodio svoju teoriju uvodeći u jednadžbe takozvanu kozmološku konstantu. To je bila nova »antigravitacijska« sila, koja, za razliku od drugih sila, ne dolazi ni iz kojeg posebnog izvora, nego je ugrađena u samo tkanje prostor-vremena. Njegova kozmološka konstanta pridodala je prostor-vre-

menu tendenciju da se širi, i to u mjeri određenoj točno tako da uravnoteži privlačnu silu sve materije u svemiru, kako bi to rezultiralo statičnim svemirom.

Samo je jedan čovjek, čini se, bio spreman prihvatiti opću relativnost takvu kakva jest. Dok su Einstein i drugi fizičari tražili načine da izbjegnu pretpostavku opće relativnosti prema kojoj svemir nije statičan, ruski fizičar Aleksander Friedmann odlučio ju je objasniti.

Friedmannovi modeli

Jednadžbe opće relativnosti koje određuju kako se svemir razvijao u vremenu previše su složene da bi se rješavale u detalje. Umjesto toga, Friedmann je postavio dvije vrlo jednostavne pretpostavke o svemiru: da svemir izgleda jednako bez obzira na to u kojem smjeru ga gledamo, te da bi to vrijedilo i kad bismo ga pogledali s bilo koje druge točke. Na temelju opće relativnosti i tih dviju pretpostavki, Friedmann je pokazao kako ne bismo trebali očekivati statični svemir. U biti, 1922., nekoliko godina prije otkrića Edwina Hubblea, Friedmann je predvidio točno ono što će i Hubble otkriti.

Pretpostavka da svemir izgleda jednako u bilo kojem smjeru očito nije točna. Na primjer, druge zvijezde u našoj galaksiji formiraju specifičnu traku svjetla preko noćnog neba zvanu Mliječna staza. Ali kad gledamo udaljene galaksije, čini se kako ih je, manje ili više, jednak broj u svakom smjeru. Tako da se čini da svemir, ugrubo govoreći, jest isti u svim smjerovima, pod pretpostavkom da ga gledamo na velikoj skali, uspoređujući udaljenosti između galaksija.

Dugo vremena bilo je to dostatno opravdanje za Friedmannovu pretpostavku – kao grubu aproksimaciju stvarnog svemira. Ali u novije vrijeme jedna slučajnost

razotkrila je činjenicu da je Friedmannova pretpostavka u stvari izuzetno točan opis našeg svemira. Tijekom 1965. dva američka fizičara, Arno Penzias i Robert Wilson, radili su u Bellovim laboratorijima u New Jerseyju dizajnirajući vrlo osjetljiv detektor mikrovalova, namijenjen komunikaciji sa satelitima u orbiti. Zabrinuli su se kad su otkrili da njihov detektor prima više šumova nego što je trebao, a ti šumovi, prema svemu sudeći, nisu dolazili ni iz kakvog određenog smjera. Prvo su provjerili je li uzrok šuma možda ptičji izmet na detektoru ili kakav drugi kvar uređaja, ali to su ubrzo odbacili. Znali su da bi bilo kakva buka koja dolazi iz atmosfere morala biti jača kad detektor nije usmjeren nego kada je usmjeren, jer se atmosfera pokazuje gušćom ako je snimana iz kuta.

Neočekivani šum bio je jednak bez obzira na smjer u kojem je bio usmjeren detektor, tako da je morao dolaziti odnekud izvan atmosfere. Bio je, k tome, jednak i danju i noću, i to tijekom čitave godine, iako Zemlja rotira oko svoje osi i kruži oko Sunca. To je pokazivalo kako to zračenje mora dolaziti s onu stranu Sunčeva sustava, pa čak i s onu stranu galaksije, jer u suprotnom bi variralo kada Zemlja usmjeri detektor u različitim smjerovima.

U stvari, mi znamo da zračenje mora putovati do nas iz većeg dijela čitavog vidljivog svemira. Budući da se činilo jednakim iz svih smjerova, i svemir bi trebao biti isti u svim smjerovima, barem kad govorimo o velikim razmjerima. Znamo da u kojem god smjeru pogledali, taj šum nikad ne varira za više od jednog djelića na deset tisuća. Tako su Penzias i Wilson nehotice nabasali na iznimno točnu potvrdu Friedmannove prve pretpostavke.

Otprilike u isto vrijeme, dva američka fizičara s obližnjeg Sveučilišta Princeton, Bob Dicke i Jim Peebles, također su se zanimali za mikrovalove. Radili su na prijedlogu koji je postavio George Gamow, bivši student Aleksandra

Friedmanna, da je rani svemir morao biti vrlo vruć i gust, te isijavati bijelim usijanjem. Dicke i Peebles smatrali su da bismo i dalje morali biti u stanju vidjeti taj sjaj, jer bi svjetlost ranog svemira iz vrlo udaljenih dijelova svemira do nas trebala dopirati tek sada. Međutim, zbog činjenice da se svemir širi, to bi svjetlo moralo imati pomak prema crvenom kraju spektra u tako velikoj mjeri da bi se nama danas moralo činiti kao mikrovalna radijacija. Dicke i Peebles tražili su tu radijaciju kada su Penzias i Wilson doznali za njihov rad i shvatili kako su je već pronašli. Za to su Penzias i Wilson dobili Nobelovu nagradu 1978., što je, čini se, prilično pogodilo Dickea i Peeblesa.

E sad, na prvi pogled, može nam se učiniti kako svi ti dokazi da se svemir čini jednakim, ma u kojem ga mi smjeru gledali, sugeriraju kako je naš položaj u svemiru specifičan. Posebice se može učiniti da se mi, ako već vidimo kako se sve druge galaksije udaljavaju od nas, nalazimo u središtu svemira. Za to, ipak, postoji alternativno objašnjenje: svemir bi također mogao izgledati isti u svim smjerovima i kad bismo ga promatrali iz bilo koje druge galaksije. To je, kao što smo vidjeli, druga Friedmannova pretpostavka.

Mi nemamo znanstveni dokaz za ili protiv te pretpostavke. Vjerujemo u to samo na temelju skromnosti. Bilo bi stvarno izvanredno kad bi svemir jednako izgledao iz bilo kojeg smjera promatrano od nas, a da nije tako gledano s drugih točki u svemiru. Prema Friedmannovu modelu, sve se galaksije kreću izravno jedna od druge. Situacija je prilično nalik balonu koji se konstantno napuhuje, i koji na sebi ima nacrtane brojne točkice. Kako se balon širi, udaljenost između svake dvije točke se povećava, ali ne postoji točka za koju biste mogli reći da je središte širenja. Štoviše, čim su točke udaljenije, brže će se i udaljavati jedna od druge. Na sličan način, u Friedmannovu modelu brzina kojom se bilo koje dvije galaksije međusobno udaljavaju

proporcionalna je njihovoj međusobnoj udaljenosti. Tako da je on predvidio kako će pomak galaksije prema crvenom biti izravno proporcionalan njegovoj udaljenosti od nas, baš kao što je Hubble otkrio.

Unatoč uspjehu njegova modela i njegovu predviđanju Hubbleovih opažanja, Friedmannov rad ostao je uglavnom nepoznat na Zapadu. O njemu se pročulo tek nakon što su 1935. godine slične modele otkrili američki fizičar Howard Robertson i britanski matematičar Arthur Walker, reagirajući na Hubbleovo otkriće jednakomjernog širenja svemira.

Iako je Friedmann otkrio samo jednu, postoje tri različite vrste modela koji se pokoravaju dvjema temeljnim Friedmannovim pretpostavkama. U prvoj vrsti – koju je Friedmann otkrio – svemir se širi dovoljno sporo da bi gravitacijska privlačnost između različitih glaksija uzrokovala usporavanje širenja, pa na kraju i njegovo zaustavljanje. Galaksije bi se tada počele kretati jedne prema drugima i svemir bi se počeo skupljati. Udaljenost između susjednih galaksija počinje na nuli, povećava se do maksimuma, a potom se ponovno smanjuje na nulu.

U drugoj vrsti rješenja, svemir se širi tako brzo da gravitacijska privlačnost nikad ne uspijeva usporiti ga, mada ga donekle usporava. Udaljenost između susjednih galaksija u tom modelu počinje od nule, a u konačnici se galaksije međusobno udaljavaju ravnomjernom brzinom.

Na kraju, postoji i treća vrsta rješenja, u kojem se svemir širi upravo dovoljnom brzinom da izbjegne rekolaps. U tom slučaju udaljavanje također počinje na nuli, i zauvijek se povećava. Ipak, brzina kojom se galaksije udaljavaju jedna od druge postaje sve manjom, iako nikad posve ne doseže nulu.

Značajna osobina prve vrste Friedmannovog modela jest da svemir nije beskonačan u prostoru, ali istodobno

prostor nema nikakvu granicu. Gravitacija je tako jaka da se prostor uvija oko samoga sebe, čineći ga prilično nalik na Zemljinu površinu. Ako netko uporno putuje u istom smjeru po površini Zemlje, nikada neće naići na nepremostivu zapreku niti će pasti s ruba, nego će na kraju doći na mjesto s kojeg je krenuo. Prostor, prema prvom Friedmannovom modelu, vrlo je nalik tome, s tim da sadrži tri dimenzije, a ne dvije, kao što je slučaj s površinom Zemlje. Četvrta dimenzija – vrijeme – također je konačna u protežnosti, ali ona je poput crte s dva kraja ili granice, s početkom i krajem. Kasnije ćemo vidjeti da, kad spojimo opću relativnost i načelo neodređenosti kvantne mehanike, postaje moguće da i prostor i vrijeme budu konačni i bez bilo kakvih rubova ili granica. Zamisao da bi netko mogao obići točno oko svemira i završiti na mjestu s kojeg je krenuo je krasna znanstvena fantastika, ali nema mnogo praktičnog značaja jer je moguće pokazati da bi svemir rekolabirao natrag na nultu veličinu prije nego što ga stignemo obići. Morali biste putovati brže od svjetla kako biste stigli na mjesto s kojeg ste krenuli prije nego što svemir dođe svome kraju – a to nije moguće.

No, koji Friedmannov model opisuje naš svemir? Hoće li se svemir na kraju prestati širiti i početi skupljati, ili će se zauvijek širiti? Kako bismo odgovorili na to pitanje, moramo znati sadašnju brzinu širenja svemira i njegovu sadašnju prosječnu gustoću. Ako je gustoća manja od određene kritične vrijednosti, zadane brzinom širenja, gravitacijska privlačnost bit će preslaba da obuzda širenje. Ako je gustoća veća od kritične vrijednosti, gravitacija će zaustaviti širenje u nekom vremenu u budućnosti, te uzrokovati rekolaps svemira.

Sadašnju brzinu širenja možemo odrediti mjereći brzine kojima se galaksije udaljavaju od nas, koristeći Dopplerov efekt. To se može obaviti veoma točno. Međutim,

udaljenost među galaksijama nije nam dobro poznata jer je možemo samo neizravno mjeriti. Tako znamo jedino to da se svemir širi između pet i deset posto svakih tisuću milijuna godina. No, naša nesigurnost u vezi sa sadašnjom prosječnom gustoćom svemira čak je i veća.

Ako zbrojimo mase svih zvijezda koje možemo vidjeti u svojoj galaksiji i drugim galaksijama, ukupni zbroj je manji od jedne stotine količine potrebne da zaustavi širenje svemira, čak i pri najnižoj procjeni brzine širenja. Ali znamo da naša i druge galaksije moraju sadržati veliku količinu tamne tvari koju ne možemo izravno vidjeti, no za koju znamo da je tamo mora biti, zbog utjecaja njezine gravitacijske privlačnosti na orbite zvijezda i plina u galaksijama. Dapače, budući da se većina galaksija nalazi u klasterima, možemo na sličan način zaključiti o prisutnosti još veće količine tamne tvari u prostoru među galaksijama u tim klasterima, po utjecaju koji tamna tvar ima na kretanje tih galaksija. Kad zbrojimo svu tu tamnu tvar, i dalje imamo samo jednu desetinu količine potrebne da zaustavi širenje. Ipak, moguće je da postoji neki drugi oblik materije koji još nismo otkrili i koji bi mogao povisiti prosječnu gustoću svemira sve do kritične vrijednosti potrebne da se zaustavi širenje.

Postojeći dokazi, stoga, sugeriraju da će se svemir vjerojatno nastaviti zauvijek širiti. Ali ne trebamo se oslanjati na to. Jedino u što stvarno možemo biti sigurni jest to da čak i ako svemir bude rekolabirao, neće to učiniti još barem narednih deset tisuća milijuna godina, budući da se već dosad širio najmanje toliko dugo. To nas ne treba nepotrebno brinuti jer će dotad, osim ako budemo imali kolonije izvan Sunčeva sustava, ljudska vrsta već odavno izumrijeti, u potpunosti nestati zajedno sa smrću našega Sunca.

Veliki prasak

Sva Friedmannova rješenja imaju tu osobinu da je u nekom vremenu u prošlosti, u razdoblju između deset i dvadeset tisuća milijuna godina unatrag, udaljenost između susjednih galaksija morala biti nula. U to vrijeme, koje zovemo Velikim praskom, gustoća svemira i zakrivljenost prostor-vremena morali su biti beskonačni. To znači da opća teorija relativnosti – na kojoj se temelje Friedmannova rješenja – predviđa postojanje točke singularnosti u svemiru.

Sve naše znanstvene teorije formulirane su na pretpostavci da je prostor-vrijeme glatko i gotovo ravno, tako da sve one padaju na singularnosti Velikog praska, gdje je zakrivljenost prostor-vremena beskonačna. To znači da čak i ako su postojali neki događaji prije Velikog praska, ne možemo ih koristiti da bismo odredili što će se dogoditi kasnije, jer se predvidljivost lomi na Velikom prasku. U skladu s tim, ako znamo samo što se dogodilo poslije Velikog praska, ne možemo odrediti što se dogodilo prije njega. Što se nas tiče, događaji prije Velikog praska nemaju posljedica, pa ne trebaju biti dijelom znanstvenog modela svemira. Stoga ih trebamo izuzeti iz modela i reći da je vrijeme započelo s Velikim praskom.

Mnogim ljudima se ne sviđa ideja po kojoj vrijeme ima početak, vjerojatno stoga što im miriše na božansku intervenciju. (Katolička se crkva, s druge strane, čvrsto uhvatila za model Velikog praska i 1951. službeno proglasila da je on u skladu s Biblijom.) Bilo je mnogo pokušaja da se izbjegne zaključak kako je postojao Veliki prasak. Prijedlog koji je pridobio najveću podršku nazvan je teorijom stabilnog stanja. Tu su teoriju 1948. iznijela dvojica izbjeglica iz Austrije, Hermann Bondi i Thomas Gold, zajedno s Britancem Fredom Hoyleom koji je tijekom rata s njima radio na razvitku radara. Prema njihovoj ideji, dok se

galaksije udaljavaju jedna od druge, u prostoru između njih stalno se formiraju nove galaksije, od nove tvari koja se stalno stvara. Svemir bi prema tome izgledao otprilike jednako u svako vrijeme i sa svih točaka u prostoru.

Teorija stabilnog stanja zahtijeva modifikaciju opće relativnosti kako bi se dopustilo stalno stvaranje materije, ali stopa njezine uključenosti bila je toliko niska – oko jedne čestice po kubičnom kilometru godišnje. Teorija je bila dobra znanstvena teorija, u smislu da je bila jednostavna i da je postavljala određena predviđanja koja se mogu provjeriti promatranjem. Prema jednom od tih predviđanja, broj galaksija ili sličnih objekata u bilo kojoj zapremnini prostora ostajao bi jednak bez obzira na vrijeme i mjesto s kojega promatramo svemir.

Tijekom kasnih 50-ih i ranih 60-ih godina 20. stoljeća, na Cambridgeu je provođeno istraživanje radiovalova iz dalekog svemira, a provodila ga je grupa astronoma predvođenih Martinom Ryleom. Skupina iz Cambridgea pokazala je kako većina tih radioizvora mora ležati izvan naše galaksije, te da tamo postoji mnogo više slabih izvora nego jakih. Oni su slabe izvore interpretirali kao udaljenije, a jače kao bliže. Potom, činilo se da, kad je riječ o bližim izvorima, postoji manje izvora po jedinici volumena prostora nego kad je riječ o udaljenijima.

To je moglo značiti da se nalazimo u središtu velikog područja svemira u kojem je manje izvora nego drugdje. Alternativno, to je moglo značiti i da su izvori bili brojniji u prošlosti, u vrijeme kad su radio valovi krenuli na svoje putovanje prema nama, nego što su to danas. Svako objašnjenje proturiječilo je teoriji stabilnog stanja. Tim više, otkriće mikrovalne radijacije do kojeg su 1965. došli Penzias i Wilson također je upućivalo na to da je svemir

morao biti mnogo gušći u prošlosti. Teorija stabilnog stanja stoga je nažalost morala biti napuštena.

Drugi pokušaj da se izbjegne zaključak kako je morao postojati Veliki prasak i, prema tome, početak vremena, napravila su dva ruska znanstvenika, Evgeni Lifshitz i Isak Khalatnikov, 1963. godine. Oni su sugerirali kako bi Veliki prasak mogao biti samo osobitost Friedmannovih modela, a ti su modeli, uostalom, samo aproksimacija stvarnog svemira. Vjerojatno su, od svih modela koji su donekle podsjećali na stvarni svemir, samo Friedmannovi sadržavali singularnost Velikog praska. U Friedmannovim modelima sve galaksije se kreću izravno jedna od druge. Stoga ne iznenađuje da su u nekom trenutku prošlosti sve one bile na istom mjestu. U pravom svemiru, međutim, galaksije ne samo da se kreću izravno jedna od druge – one također imaju i mala sporadična ubrzanja. Tako da u stvarnosti one nisu nikada morale stvarno biti sve na istom mjestu, nego samo veoma blizu jedne drugima. Pretpostavimo, dakle, da sadašnji ekspandirajući svemir nije posljedica singularnosti Velikog praska nego ranije faze kontrakcije; kad je svemir kolabirao, možda nisu kolabirale baš sve čestice u njemu, nego su možda prošle jedne pokraj drugih a potom se počele i međusobno udaljavati, proizvodeći sadašnje širenje svemira. Kako onda možemo reći je li stvarni svemir zaista započeo Velikim praskom?

Lifshitz i Khalatnikov su zapravo proučili modele svemira, ugrubo nalik Friedmannovim modelima, ali uzeli su u obzir nepravilnosti i slučajna ubrzanja galaksija u stvarnom svemiru. Pokazali su da takvi modeli mogu započeti s Velikim praskom, čak i ako se galaksije više ne kreću uvijek izravno jedna od druge. Ali tvrdili su kako je to i dalje moguće jedino u određenim iznimnim modelima u kojima se sve galaksije kreću na isti način.

Kad je riječ o modelima nalik na Friedmannove, argumentirali su, budući da se čini kako postoji beskonačno više modela bez singularnosti Velikog praska nego što ih je s njom, trebali bismo zaključiti kako nije vjerojatno da je postojao Veliki prasak. Kasnije su shvatili, međutim, da postoji mnogo veća općenita klasa modela nalik na Friedmannove koji imaju singularnosti, i u kojima se galaksije ne moraju kretati na neki poseban način. Stoga su 1970. godine povukli svoje tvrdnje.

Rad Lifshitza i Khalatnikova vrijedan je stoga što je pokazao da je svemir mogao imati singularnost – Veliki prasak – ako je opća teorija relativnosti točna. Ipak, to nije riješilo ključni problem: predviđa li opća relativnost da bi naš svemir trebao imati Veliki prasak, početak vremena? Odgovor na to pitanje stigao je iz posve drugačijeg pristupa koji je primijenio britanski fizičar Roger Penrose 1965. godine. On je upotrijebio način na koji se u općoj relativnosti ponašaju konusi svjetla, i činjenicu da je gravitacija uvijek privlačna, kako bi pokazao da je zvijezda koja kolabira pod vlastitom gravitacijom zarobljena u području čije se granice u konačnici skupljaju do veličine nula. To znači da će sva materija u zvijezdi biti komprimirana u područje nultog volumena, tako da gustoća tvari i zakrivljenost vrijeme-prostora postaju beskonačni. Drugim riječima, postoji singularnost sadržana unutar područja prostor-vremena, poznata kao crna rupa.

Na prvi pogled, Penroseovi rezultati ne govore ništa o tome je li ili nije bilo singularnosti Velikog praska u prošlosti. Međutim, u vrijeme kada je Penrose izveo svoj teorem, ja sam bio student-istraživač i očajnički sam tražio problem kojim bih upotpunio svoju doktorsku tezu. Shvatio sam da bi, kad bismo okrenuli smjer vremena u Penroseovu teoremu tako da kolaps postane ekspanzija, uvjeti teorema i dalje bili održani, uz pretpostavku da je

svemir u sadašnjem trenutku i na velikoj skali ugrubo nalik na Friedmannov model. Penroseov teorem pokazao je da bilo koja kolabirajuća zvijezda mora završiti u singularnosti; dokaz o obrnutom vremenu pokazao je kako bilo koji svemir nalik na Friedmannov ekspandirajući svemir mora započeti sa singularnošću. Iz tehničkih razloga, Penroseov teorem zahtijeva da svemir bude beskrajan u prostoru. Dakle, to mogu koristiti kako bih dokazao da singularnosti mora biti samo ako se svemir širi dovoljno brzo da izbjegne ponovni kolaps, jer samo taj Friedmannov model sadrži beskonačnost u prostoru.

Tijekom sljedećih nekoliko godina razvio sam nove matematičke tehnike kako bih otklonio taj i druge tehničke uvjete iz teorema koji dokazuju da se singularnost nužno javlja. Konačni rezultat bio je rad koji smo Penrose i ja zajednički objavili 1970. godine i kojim smo dokazali da je singularnost Velikog praska morala postojati, s jedinim uvjetom da je opća relativnost točna i da svemir sadrži barem toliko materije koliko možemo vidjeti.

Bilo je mnogo protivljenja tom našem radu, djelomice od Rusa koji su slijedili onu liniju što su je postavili Lifshitz i Khalatnikov, a djelomice od ljudi koji su čitavu tu ideju singularnosti smatrali odbojnom jer kvari ljepotu Einsteinove teorije. Međutim, s matematičkim teoremom se ne možete svađati. Tako je sada općeprihvaćeno da je svemir morao imati početak.

Treće predavanje
Crne rupe

Treće predavanje
Crna rupe

03.

Pojam *crne rupe* stvoren je relativno nedavno. Skovao ga je 1969. američki znanstvenik John Wheeler, koji ga je rabio kao ilustrativan opis ideje koja datira najmanje dvjesto godina unatrag. U to su vrijeme postojale dvije teorije o svjetlu. Jedna je tvrdila da se ono sastoji od čestica, a druga da se sastoji od valova. Danas znamo da su zapravo obje teorije točne. Prema valno/čestičnoj dualnosti kvantne mehanike, svjetlo se može smatrati i valom i česticom. U teoriji prema kojoj je svjetlost sačinjena od valova nije bilo jasno kako bi ona reagirala na gravitaciju. Ali ako je svjetlo načinjeno od čestica, možemo očekivati da gravitacija djeluje na njih na isti način na koji djeluje na topovske kugle, rakete i planete.

S tom je prepostavkom sveučilišni nastavnik na Cambridgeu John Michell 1783. napisao rad objavljen u *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. U njemu je naznačio kako bi zvijezda koja je dovoljno masivna i kompaktna imala tako jako gravitacijsko polje da svjetlo ne bi moglo pobjeći. Prije nego što bi dospjelo daleko, bilo koje svjetlo emitirano s površine zvijezde bilo bi povučeno natrag zvijezdinom gravitacijskom silom. Michell je iznio pretpostavku da postoji velik broj takvih zvijezda. Iako ih ne bismo bili u stanju vidjeti jer njihovo svjetlo ne bi dopiralo do nas, ipak bismo osjećali njihovu gravitacijsku

privlačnost. Takve objekte danas zovemo crnim rupama, jer to one i jesu – crne praznine u svemiru.

Sličan je prijedlog nekoliko godina kasnije iznio i francuski znanstvenik Marquis de Laplace, očito neovisno o Michellu. Zanimljivo, uključio ga je samo u prvo i drugo izdanje svoje knjige *Sustav svijeta*, a izostavio iz kasnijih izdanja; vjerojatno je odlučio kako je riječ o suludoj ideji. U stvari, zapravo nije održivo tretirati svjetlo na isti način kao topovske kugle u Newtonovoj teoriji gravitacije jer je brzina svjetla konstantna. Topovska kugla, kad je ispalimo sa Zemlje, usporit će pod utjecajem gravitacije i na kraju se zaustaviti i pasti natrag. Foton se, međutim, mora nastaviti kretati konstantnom brzinom. Kako onda njutnovska gravitacija može utjecati na svjetlo? Konzistentna teorija o utjecaju gravitacije na svjetlo nije se pojavila sve dok Einstein nije iznio svoju teoriju opće relativnosti 1915. godine; čak je i nakon toga prošlo mnogo vremena prije no što su razrađene implikacije teorije na masivne zvijezde.

Kako bismo razumjeli kako nastaju crne rupe, najprije moramo razumjeti životni ciklus zvijezde. Zvijezda se formira kad golema količina plina, uglavnom vodika, počinje kolabirati u sebe pod utjecajem vlastite gravitacijske privlačnosti. Dok se skuplja, atomi plina sudaraju se jedni s drugima sve češće i češće i sve većim i većim brzinama – plin se zagrijava. Na kraju će plin biti toliko vruć da se atomi vodika prilikom sudaranja više neće odbijati jedan o drugoga, nego će se umjesto toga stopiti i stvoriti atom helija. Upravo vrućina koja se otpušta prilikom te reakcije, koja podsjeća na kontroliranu hidrogensku bombu, ono je što zvijezdu čini sjajnom. Dodatna vrućina također povećava pritisak plina sve dok pritisak ne postane dovoljno jak da uravnoteži gravitacijsku privlačnost, i plin se prestaje skupljati. To je pomalo poput balona u kojem postoji ravnoteža između pritiska zraka

unutra koji nastoji proširiti balon, i napetosti gumene površine koja nastoji skupiti balon.

Zvijezde tako mogu ostati stabilne dugo vremena, dok vrućina prouzročena nuklearnim reakcijama uravnotežuje gravitacijsku privlačnost. Konačno, međutim, zvijezda će iscrpiti svoj vodik i druga nuklearna goriva. I paradoksalno, s čim više goriva zvijezda započinje taj proces, prije će ga potrošiti. To je stoga jer što je zvijezda veća, ona mora biti vrelija kako bi se uravnotežila njezina gravitacijska privlačnost. A što je vrelija, tim će brže potrošiti svoje gorivo. Naše Sunce vjerojatno ima dovoljno goriva za otprilike sljedećih pet tisuća milijuna godina, ali masivnije zvijezde mogu potrošiti svoje gorivo u roku od samo stotinu milijuna godina, što je mnogo manje od starosti našeg svemira. Kad zvijezda ostane bez goriva, počinje se hladiti, pa time i skupljati. Što se tada možda događa s njom, prvi put je shvaćeno krajem 20-ih godina 20. stoljeća.

Godine 1928. indijski diplomac Subrahmanyan Chandrasekhar otplovio je za Englesku kako bi na Cambridgeu studirao s britanskim astronomom Sir Arthurom Eddingtonom. Eddington je bio stručnjak za opću relativnost. Priča se kako je jedan novinar, ranih 1920-ih, rekao Eddingtonu kako je čuo da postoje samo tri čovjeka na svijetu koji razumiju opću relativnost. Eddington mu je odgovorio: »Pokušavam se dosjetiti tko bi bila ta treća osoba.«

Tijekom svog putovanja iz Indije, Chandrasekhar je izračunao koliko bi velika mogla biti zvijezda, a da i dalje uspijeva odolijevati vlastitoj gravitaciji nakon što je potrošila sve svoje gorivo. Zamisao je bila sljedeća: kad zvijezda postaje mala, čestice materije međusobno se veoma približavaju. Ali Paulijevo načelo isključenja kaže kako dvije materijalne čestice ne mogu istodobno imati isti položaj i isto ubrzanje. Čestice materije stoga moraju

imati različita ubrzanja. To ih tjera da se međusobno udaljavaju i time pridonose širenju zvijezde. Zvijezda stoga može održavati konstantan radijus zahvaljujući ravnoteži između privlačnosti gravitacije i odbojnosti koja nastaje zbog načela isključenja, baš kao što je ranije u svom životu gravitacija bivala uravnotežena vrućinom.

Chandrasekhar je, međutim, shvatio da postoji ograničenje u odbojnosti koju može pružiti načelo isključenja. Teorija relativnosti ograničava maksimalnu razliku u ubrzanjima materijalnih čestica u zvijezdi na brzinu svjetla. To znači da kad zvijezda postane dovoljno gusta, odbojnost uzrokovana načelom isključenja postat će manja od privlačnosti gravitacije.

Chandrasekhar je izračunao da zvijezda s masom većom od oko jedne i pol mase našeg Sunca, ne bi bila u stanju održati se pod pritiskom vlastite gravitacije. Ta masa sada je poznata kao *Chandrasekharova granica.*

To ima ozbiljne implikacije na konačnu sudbinu masivnih zvijezda. Ako je masa zvijezde manja od Chandrasekharove granice, na kraju se može prestati skupljati i može se smiriti u mogućem konačnom stanju kao *bijeli patuljak* s radijusom od nekoliko tisuća kilometara i gustoćom od više stotina tona po kubičnom centimetru. Bijelog patuljka održava načelo isključenja odbijanja između elektrona u njegovoj materiji. Možemo promatrati veliki broj takvih zvijezda, bijelih patuljaka. Jedan od prvih koji je otkriven jest zvijezda koja kruži oko Siriusa, najblistavija zvijezda na noćnom nebu.

Postalo nam je jasno kako postoji i drugo moguće konačno stanje zvijezde, također kad je riječ o zvijezdama mase ograničene na masu našeg Sunca ili dvostruko veću od njega, ali po veličini mnogo manjim nego što je čak i bijeli patuljak. Takve zvijezde održavalo bi načelo isključenja odbijanja između neutrona i protona, prije

nego između elektrona. Te zvijezde su zato prozvane neutronskim zvijezdama. One bi imale radijus od samo petnaestak kilometara, a gustoću od stotina milijuna tona po kubičnom centimetru. U vrijeme kad su postavljena prva predviđanja o njima, nije bilo nikakvog načina da se neutronske zvijezde promatraju, pa su one uočene i otkrivene tek znatno kasnije.

S druge strane, zvijezde s masom većom od Chandrasekharove granice, imaju velik problem kad dođu do kraja svojih zaliha goriva. U nekim slučajevima mogu eksplodirati, ili pak uspiju odbaciti dovoljnu količinu materije reducirajući time svoju masu na neku mjeru ispod spomenute granice, no teško je povjerovati da se to uvijek događa, bez obzira na veličinu zvijezde. Kako bi zvijezde znale da moraju izgubiti na težini? I čak i ako svaka zvijezda uspije izgubiti dovoljno mase, što bi se dogodilo ako dodate više mase bijelom patuljku ili neutronskoj zvijezdi, tako da se prekorači granica? Bi li kolabirala do beskonačne gustoće?

Eddington je bio šokiran implikacijama tih pretpostavki i odbio je vjerovati Chandrasekharovim rezultatima. On je smatrao kako naprosto nije moguće da zvijezda kolabira u jednu točku. To je bilo i gledište većine tadašnjih znanstvenika. I sam je Einstein napisao rad u kojem je ustvrdio da se zvijezde ne bi skupile na nultu veličinu. Negativan stav drugih znanstvenika, posebice Eddingtona, njegova bivšeg učitelja i vodećeg autoriteta na području strukture zvijezda, natjerao je Chandrasekhara da napusti taj smjer svojega rada te se okrene drugim problemima u astronomiji. Ipak, kada je 1983. godine dobio Nobelovu nagradu, bilo je to, barem djelomice, i za njegov rani rad o graničnoj masi hladnih zvijezda.

Chandrasekhar je pokazao kako načelo isključenja ne može zaustaviti kolaps zvijezda masivnijih od Chandrasekharove granice. Ali problem s razumijevanjem onoga što bi se

dogodilo takvoj zvijezdi, prema općoj relativnosti, nije bio riješen sve do 1939. godine i istraživanja mladog Amerikanca Roberta Oppenheimera. Njegovi rezultati sugerirali su kako se ne bi pojavile nikakve uočljive posljedice koje bi se mogle otkriti teleskopima postojećim u to vrijeme. A onda je buknuo rat i sam Oppenheimer uključio se u projekt atomske bombe.

A nakon rata problem gravitacijskog kolapsa bio je uglavnom zaboravljen jer se većina znanstvenika zainteresirala za to što se zbiva na skali atoma i njihovih jezgri. Tijekom 1960-ih, međutim, interes za astronomske probleme na širokoj skali ponovno je oživljen velikim povećanjem broja i dometa astronomskih promatranja do kojih je dovela primjena moderne tehnologije. Oppenheimerov rad ponovno su otkrili i proširili brojni ljudi.

Slika koju danas imamo zahvaljujući Oppenheimerovu radu jest sljedeća: gravitacijsko polje zvijezde mijenja putanju svjetlosnih zraka u prostor-vremenu u odnosu na putanju koju bi imale da zvijezda nije prisutna. Svjetlosni konusi, koji upućuju na putanju koju bi zrake što ih njihovi vrhovi emitiraju slijedili u prostoru i vremenu, lagano su zakrivljeni prema unutra u blizini površine zvijezde. To se može vidjeti u zakrivljenosti svjetla udaljenih zvijezda promatranog tijekom pomrčine Sunca. Kad se zvijezda skuplja, gravitacijsko polje na njezinoj površini postaje jače i svjetlosni konusi postaju još zakrivljeniji prema unutra. To dodatno otežava svjetlu zvijezde da pobjegne, i svjetlost se promatraču iz daljine čini prigušenija i crvenkastija.

Konačno, kad se zvijezda skupi do određenog kritičnog radijusa, gravitacijsko polje na površini postaje toliko jako da se svjetlosni konusi uvijaju unutra do te mjere da svjetlost više ne može pobjeći. Prema teoriji relativnosti, ništa ne može putovati brže od svjetla. Tako, ako svjetlost ne može pobjeći, ne može ni bilo što drugo. Sve je povučeno

natrag silom gravitacijskog polja. Tako imamo određeni niz događaja, područje prostor-vremena, iz kojeg nije moguće umaći do udaljenog promatrača. To područje danas zovemo crnom rupom. Njezinu granicu nazivamo horizontom događaja. Ona se poklapa s putanjom svjetlosnih zraka koje nisu uspjele pobjeći iz crne rupe.

Kako bismo razumjeli to što možemo vidjeti ako promatramo kako zvijezda kolabira u crnu rupu, moramo se prisjetiti da u teoriji relativnosti ne postoji apsolutno vrijeme. Svaki promatrač ima svoje vlastito mjerenje vremena. Za nekog na zvijezdi vrijeme će biti drugačije od vremena koje vrijedi za nekog u daljini, i to zbog gravitacijskog polja zvijezde. Taj efekt mjeren je na Zemlji, prilikom pokusa sa satovima na vrhu i u podnožju vodenog tornja. Pretpostavimo da neustrašivi astronaut s površine kolabirajuće zvijezde šalje signal svake sekunde, prema vlastitom satu, svome svemirskom brodu koji kruži oko zvijezde.

U nekom trenutku prema njegovu satu, recimo u 11 sati, zvijezda se počne skupljati ispod kritičnog radijusa pri kojem gravitacijsko polje postaje toliko jako da signali više ne mogu dosegnuti svemirski brod.

Njegovi prijatelji koji promatraju s broda otkrit će da se intervali između uzastopnih signala sve više i više povećavaju kako se bliži 11 sati. Međutim, taj efekt će biti vrlo malen prije 10:59:59. Morat će čekati samo malo više od sekunde između astronautovog signala u »njegovih« 10:59:58, i onog koji pošalje kad na njegovu satu piše 10:59:59, no potom će zauvijek čekati da im stigne signal za 11 sati. Svjetlosni valovi emitirani s površine zvijezde između 10:59:59 i 11 sati, prema astronautovu satu, bit će raspršeni preko beskrajnog razdoblja vremena, gledano sa svemirskog broda.

Vremenski interval između dolazaka uzastopnih signala na svemirski broj bit će sve dulji i dulji, a isto tako će se

svjetlost zvijezde činiti sve crvenijom i sve bljeđom. Na kraju će zvijezda postati tako tamna da je neće više biti moguće vidjeti sa svemirskog broda. Sve što ostane bit će crna rupa u svemiru. Zvijezda će, ipak, nastaviti zračiti prema brodu određenu gravitacijsku silu. To je zato što jer je zvijezda i dalje vidljiva brodu, barem načelno. Jedino što je svjetlost s površine, uslijed zvijezdine gravitacijske sile, toliko pomaknuta prema crvenom da je postala nevidljiva. Međutim, crveni pomak ne utječe na gravitacijsko polje same zvijezde. Stoga će svemirski brod nastaviti kružiti oko crne rupe.

Rad koji smo Roger Penrose i ja napravili između 1965. i 1970. pokazao je da, prema općoj relativnosti, mora postojati singularnost beskrajne gustoće unutar crne rupe. To je slično Velikom prasku na početku vremena, samo što bi se u ovom slučaju radilo o kraju vremena za kolabirajuće nebesko tijelo i našeg astronauta. U singularnosti se slamaju zakoni znanosti i naša sposobnost predviđanja budućnosti. No, svi promatrači koji su ostali izvan crne rupe neće biti zahvaćeni tim nestankom predvidljivosti, jer ni svjetlo niti bilo koji drugi signal ne može do njih doprijeti iz singularnosti.

Ta izuzetna činjenica dovela je Rogera Penrosea do toga da predloži hipotezu o kozmičkoj cenzuri, koju možemo parafrazirati rečenicom »Bog zazire od gole singularnosti.« Drugim riječima, singularnosti proizvedene gravitacijskim kolapsom javljaju se samo na mjestima kao što su crne rupe, gdje su horizontom događaja pristojno skrivene od pogleda izvana. Strogo uzevši, to je ono što je poznato kao hipoteza o slaboj kozmičkoj cenzuri: zaštititi promatrače koji ostaju izvan crne rupe od posljedica sloma predvidljivosti koji se javlja sa singularnošću. Ali ona nema veze s jadnim nesretnim astronautom koji pada u rupu. Ne bi li Bog trebao zaštititi i njegovu pristojnost?

U jednadžbama opće relativnosti postoje neka rješenja po kojima je moguće da naš astronaut vidi golu singularnost. On bi možda mogao izbjeći sudar sa singularnosti i umjesto toga propasti kroz »crvotočinu« i izaći u drugom području svemira. To bi ponudilo velike mogućnosti za putovanja kroz prostor i vrijeme, no nažalost, čini se kako bi sva rješenja mogla biti vrlo nestabilna. I najmanji poremećaj, kao što je već i prisutnost astronauta, mogu ih promijeniti tako da astronaut ne uzmogne vidjeti singularnost sve dok se s njom ne sudari i njegovo vrijeme tako dođe svome kraju. Drugim riječima, singularnost uvijek leži u njegovoj budućnosti, a nikad u njegovoj prošlosti.

Jaka verzija hipoteze o kozmičkoj cenzuri tvrdi da singularnosti u realnom rješenju uvijek leže ili posve u budućnosti, kao što je slučaj sa singularnošću gravitacijskog kolapsa, ili potpuno u prošlosti, kao kod Velikog praska. Možemo se samo nadati da stoje neke verzije hipoteze o cenzuri – jer u blizini gole singularnosti moglo bi biti moguće putovati u prošlost. Dok bi to bilo sjajno za pisce znanstvene fantastike, istodobno bi to značilo da ničiji život neće nikada biti siguran. Netko bi mogao otići u prošlost i ubiti vašeg oca ili majku prije nego što ste i začeti.

U gravitacijskom kolapsu koji stvara crnu rupu, gibanja bi bila zatomljena emisijom gravitacijskih valova. Stoga bismo očekivali da neće proteći mnogo vremena prije no što se crna rupa smiri u stabilnom stanju. Općenito se pretpostavlja da bi to konačno stabilno stanje ovisilo o detaljima vezanim uz samo tijelo koje kolabira i stvara crnu rupu. Crna rupa mogla bi imati bilo koji oblik ili veličinu, a njezin oblik možda i ne bi bio fiksiran, nego pulsirajući.

Međutim, godine 1967., proučavanje crnih rupa revolucionirao je rad koji je u Dublinu napisao Werner Israel. Israel je pokazao kako svaka crna rupa koja ne rotira mora biti savršeno okrugla ili sferična. Njezina veličina, k

tome, ovisila bi samo o njezinoj masi. Mogla bi se, u stvari, opisati određenim rješenjem Einsteinovih jednadžbi koje je poznato još od 1917., kad ga je otkrio Karl Schwarzschild nedugo nakon otkrića opće relativnosti.

Isprva, Israelijev rezultat interpretirali su mnogi ljudi, uključujući i samog Israela, kao dokaz da bi se crne rupe stvarale samo kolapsom tijela koja su bila savršeno okrugla ili sferična. Budući da nijedno stvarno tijelo nije savršeno sferično, to znači da bi, općenito, gravitacijski kolaps vodio do gole singularnosti. Postoji, međutim, drugačija interpretacija Israelovih rezultata, koju su osobito branili Roger Penrose i John Wheeler. Prema njoj bi se crna rupa trebala ponašati poput kugle tekućine. Iako tijelo može započeti u nekom nesferičnom stanju, kad ono kolabira i stvori crnu rupu, smiruje se u sferičnom stanju zahvaljujući emisiji gravitacijskih valova. Kasnija izračunavanja podržala su takvo gledište i ono je postalo općeprihvaćeno.

Israelijev rezultat bavio se samo slučajem crnih rupa koje se formiraju od nerotirajućih tijela. Prema analogiji s kuglom tekućine, očekivali bismo da crna rupa nastala kolapsom rotirajućeg tijela neće biti savršeno okrugla. Trebala bi imati ispupčenje oko ekvatora uzrokovano učinkom rotacije. Takvo malo ispupčenje vidimo na Suncu, uzrokovano njegovom rotacijom koja se odvije jednom u otprilike svakih 25 dana.

Godine 1963., Roy Kerr, Novozelanđanin, pronašao je u jednadžbama opće relativnosti niz rješenja crnih rupa, općenitijih od Schwarzschildovih rješenja. Te »Kerrove« crne rupe rotiraju konstantnom brzinom, njihova veličina i oblik ovise samo o njihovoj masi i brzini rotacije. Ako je rotacija nula, crna rupa je savršeno okrugla, a rješenje identično Schwarzschildovom. Ali ako rotacija nije nula, crna rupa se ispupčuje u blizini svog ekvatora. Stoga je prirodno nagađati da će rotirajuće tijelo koje kolabira da

bi stvorilo crnu rupu završiti u stanju opisanom Kerrovim rješenjem.

Godine 1970., kolega s kojim sam radio istraživanja, Brandon Carter, napravio je prvi korak ka potvrđivanju tog nagađanja. On je pokazao kako, uz uvjet da stabilna rotirajuća crna rupa ima os simetrije, poput zvrka, njezina veličina i oblik ovisit će samo o njezinoj masi i brzini rotacije. Potom, tijekom 1971., ja sam dokazao da bi svaka rotirajuća stabilna crna rupa svakako morala imati takvu os simetrije. Konačno, 1973., David Robinson s londonskog Kings Collegea upotrijebio je moje i Carterove rezultate kako bi pokazao da je to nagađanje bilo točno: takve crne rupe svakako se ponašaju prema Kerrovu rješenju.

Dakle, nakon gravitacijskog kolapsa crna rupa se mora smiriti u stanju u kojem može rotirati, ali ne i pulsirati. K tome, njezina veličina i oblik ovisit će samo o njezinoj masi i brzini rotacije, a ne o prirodi tijela koje je kolabiralo kako bi je stvorilo. Taj rezultat postao je poznat po maksimi »Crna rupa nema kose«. To znači da velika količina informacije o tijelu koje je kolabiralo mora biti izgubljena kad je stvorena crna rupa, jer nakon toga sve što uopće možemo mjeriti o tijelu je njezina masa i brzina rotacije. Značaj ovoga pokazat će se u sljedećem predavanju. »Ćelavi« teorem također ima veliki praktični značaj jer na tako bitan način ograničava moguće tipove crnih rupa. Prema njemu možemo napraviti detaljne modele objekata koji možda sadrže crne rupe, te usporediti predviđanja modela s opažanjima.

Crne rupe jedan su od prilično malobrojnih slučajeva u povijesti znanosti u kojima je teorija detaljno razvijena kao matematički model prije no što je promatranjem pružen bilo kakav dokaz o tome da je ona točna. Dapače, upravo to je bio jedan od glavnih argumenata protivnika crnih rupa. Kako netko može vjerovati u objekte čiji su

jedini dokaz kalkulacije temeljene na dvojbenoj teoriji opće relativnosti?

Godine 1963., međutim, Maarten Schmidt, astronom kalifornijskog opservatorija Mount Palomar, otkrio je teško vidljiv, zvjezdolik objekt u smjeru izvora radio valova nazvan 3C 273 — to znači, izvor broj 273 u trećem Cambridgeovom katalogu radioizvora. Kad je izmjerio crveni otklon objekta, otkrio je kako je prevelik da bi bio uzrokovan gravitacijskim poljem: da je riječ o gravitacijskom crvenom otklonu, objekt bi morao biti tako masivan i tako blizu nama da bi poremetio orbite planeta u sunčevu sustavu. To je sugeriralo kako je crveni otklon, dakle, uzrokovan širenjem svemira, što je pak značilo da je objekt vrlo, vrlo daleko. A da bi bio vidljiv s tolike udaljenosti, objekt mora biti veoma blistav i mora emitirati golemu količinu energije.

Čini se kako je jedini mehanizam na koji možemo pomisliti, a koji bi bio u stanju proizvesti tako velike količine energije, upravo gravitacijski kolaps, ali ne samo zvijezde, nego čitavog središnjeg područja galaksije. U međuvremenu su otkriveni brojni slični »kvazistelarni objekti«, ili kvazari, svi s jakim pomakom prema crvenom kraju spektra. Ali svi su oni i previše daleko, i preteški za promatranje da bi pružili konkluzivan dokaz crnih rupa.

Daljnji podstrek za tezu o postojanju crnih rupa pružilo je 1967. godine otkriće istraživača iz Cambridgea, Jocelyna Bella, o nekim objektima na nebu koji odašilju pravilne pulseve radiovalova. Isprva su Jocelyn i njegov mentor, Anthony Hewish, pomislili kako su stupili u kontakt s nekom tuđinskom civilizacijom u galaksiji. Dapače, sjećam se da su na seminaru, na kojem su predstavili svoje otkriće, prva četiri izvora tih pulseva nazivali LGM 1–4, pri čemu je »LGM« bila kratica za »Little Green Men« (Mali Zeleni).

Na kraju, ipak, i oni i svi drugi došli su do manje romantičnog zaključka da su ti objekti, koji su nazvani pulsarima, zapravo samo rotirajuće neutronske zvijezde. One odašilju pulseve radiovalova zbog kompliciranih zaobilazaka njihovih magnetskih polja i okolne materije. Bila je to loša vijest za pisce o svemirskim kaubojima, ali vrlo ohrabrujuća za mali broj nas koji smo u to vrijeme vjerovali u crne rupe. Bio je to prvi konkretan dokaz da neutronske zvijezde uopće postoje. Neutronska zvijezda ima radijus od oko šesnaest kilometara, što je blizu kritičnog radijusa pri kojem zvijezda postaje crna rupa. Ako zvijezda može kolabirati do tako male veličine, nije nerazumno očekivati da i druge zvijezde mogu kolabirati do još manje veličine, te postati crnim rupama.

Kako se možemo nadati da ćemo otkriti crnu rupu, kad po samoj njezinoj definiciji ona ne emitira nikakvu svjetlost? To pomalo podsjeća na traganje za crnom mačkom u podrumu punom ugljena. Srećom, postoji način, budući da – kako je naglasio još John Michell u svom pionirskom radu iz 1783. godine – crna rupa i dalje djeluje gravitacijskom silom na okolne objekte. Astronomi su promatrali brojne sustave u kojima dvije zvijezde kruže jedna oko druge, privučene jedna drugoj gravitacijom. Uočili su i sustave u kojima samo jedna vidljiva zvijezda kruži oko svoje nevidljive pratilje.

Ne možemo, naravno, odmah zaključiti kako je ta pratilja crna rupa. Može to biti i zvijezda suviše blijeda da bismo je vidjeli. Međutim, neki od takvih sustava, poput onog nazvanog Cygnus X-I, ujedno su i jaki izvori radioaktivnog zračenja. Najbolje objašnjenje tog fenomena jest da radioaktivne zrake stvara materija otpuhnuta s površine vidljive zvijezde. Dok pada prema nevidljivoj pratilji, ona razvija spiralno gibanje – prilično nalik gibanju vode dok curi iz kade – i veoma se zagrijava, emitirajući radioaktivno

zračenje. Kako bi taj mehanizam funkcionirao, nevidljivi objekt mora biti veoma malen, poput bijelog patuljka, neutronske zvijezde ili crne rupe.

E sad, prema uočenom gibanju vidljive zvijezde možemo odrediti najnižu moguću masu nevidljivog objekta. U slučaju Cygnusa X-I, riječ je o masi oko šest puta većoj od mase našeg Sunca. Prema Chandrasekharovu rezultatu, to je previše da bi nevidljivi objekt bio bijeli patuljak. Masa je prevelika i da bi bio neutronska zvijezda. Čini se, prema tome, da mora biti crna rupa.

Postoje i drugi modeli kojima se može objasniti Cygnus X–I , a koji ne uključuju crnu rupu, ali svi su prilično nategnuti. Čini se da je crna rupa jedino doista prirodno objašnjenje uočenog fenomena. Unatoč tome, kladio sam se s Kipom Thorneom s kalifornijskog Tehnološkog instituta da, u stvari, Cygnus X–I ne sadrži crnu rupu. To mi je, naime, neka vrst osiguranja. Stvarno sam se naradio oko tih crnih rupa, i sav taj posao bit će uzalud ako se pokaže da crne rupe ne postoje. No u tom slučaju, tješit ću se bar time što sam dobio okladu koja će mi priskrbiti četverogodišnju pretplatu na časopis *Private Eye*. Ako crne rupe postoje, Kip će dobiti samo jednu godinu pretplate na *Penthouse*, jer u vrijeme kad smo se okladili, 1975. godine, bili smo 80 posto sigurni da je Cygnus crna rupa. Do sada smo već, rekao bih, u to 95 posto sigurni, ali još nije došlo vrijeme da izravnamo račune.

Postoji dokaz za crne rupe u brojnim drugim sustavima naše galaksije, i za mnogo veće crne rupe u središtima drugih galaksija i kvazara. Valja također razmotriti i mogućnost da možda postoje crne rupe mase mnogo manje no što je Sunčeva. Takve crne rupe ne bi mogle nastati gravitacijskim kolapsom, jer su njihove mase ispod Chandrasekharove granice mase. Zvijezde tako male mase mogu se održati pod silom gravitacije čak i nakon

što iscrpe svoje nuklearno gorivo. Dakle, »lagane« crne rupe mogle bi se formirati samo ako je njihova materija komprimirana do golemih gustoća, uslijed veoma velikog vanjskog pritiska. Takvi uvjeti mogu se pojaviti kod vrlo velike hidrogenske bombe. Fizičar John Wheeler jednom je izračunao da bi netko, kad bi uzeo svu tešku vodu iz svih svjetskih oceana, mogao izgraditi hidrogensku bombu koja bi komprimirala materiju u središtu tako jako da bi se stvorila crna rupa. U tom slučaju, nažalost, više ne bi bilo nikoga da to promotri.

Znatno je praktičnija pretpostavka da su takve lagane crne rupe možda nastale pri visokim temperaturama i pritiscima u vrijeme ranog svemira. Crne rupe mogle su se stvoriti ako rani svemir nije bio savršeno jednolik i ravnomjeran, jer bi tada mala područja koja su bila gušća od prosjeka mogla biti komprimirana na taj način da stvore crne rupe. A mi znamo da je moralo biti određenih nepravilnosti, jer u suprotnom bi materija u svemiru i dalje bila savršeno jednoliko distribuirana u sadašnjoj epohi, umjesto da je zbijena u zvijezde i galaksije.

Bi li ili ne te nepravilnosti, nužne kad je riječ o zvijezdama i galaksijama, dovele do formiranja značajnog broja tih primordijalnih crnih rupa, ovisi o detaljima vezanim uz uvjete u ranom svemiru. Tako, kad bismo mogli odrediti koliko primordijalnih crnih rupa trenutno postoji, doznali bismo mnogo toga o vrlo ranim fazama svemira. Primordijalne crne rupe s masama većim od tisuću milijuna tona – što je masa veće planine – mogu se otkriti samo prema njihovu gravitacijskom utjecaju na drugu vidljivu materiju ili na širenje svemira. Međutim, kako ćemo otkriti u sljedećem predavanju, crne rupe na kraju i nisu tako crne: one isijavaju poput vrućeg tijela, a što su manje, tim jače sjaje. Tako bi se moglo još i pokazati da je, paradoksalno, zapravo lakše otkriti male crne rupe nego velike.

Četvrto predavanje
Crne rupe nisu tako crne

04.

Prije 1970., moje istraživanje opće relativnosti bilo je usredotočeno uglavnom na pitanje je li postojala singularnost Velikog praska. Međutim, jedne večeri u studenom te godine, nedugo nakon rođenja moje kćeri Lucy, počeo sam razmišljati o crnim rupama dok sam se spremao na spavanje. Moja invalidnost čini te pripreme prilično sporim, pa sam imao puno vremena. U to vrijeme nije bilo precizne definicije u kojem smjeru prostor-vremena se prostire unutrašnjost crne rupe, a u kojem pak njezina vanjska strana.

Već sam bio razgovarao s Rogerom Penroseom o ideji da se crna rupa definira kao niz događaja od kojih nije moguće umaknuti na veliku udaljenost. To je danas općenito prihvaćena definicija. Ona znači da granicu crne rupe, horizont događaja, stvaraju zrake svjetla koje se nisu uspjele odmaknuti od crne rupe. Umjesto toga, one tamo zauvijek ostaju, lebdeći na granicama crne rupe. To je kao da bježite od policije i uspijevate održati razmak od jednog koraka, a nikad niste u stanju stvarno pobjeći.

Odjednom sam shvatio da se putanje tih zraka svjetla ne mogu približavati jedne drugima, jer da mogu, na kraju bi morale naletjeti jedne na druge. Bilo bi to kao da još netko drugi bježi od policije u suprotnom smjeru. Oboje biste bili uhvaćeni, ili, u ovom slučaju, upali biste u crnu rupu. Ali da su te zrake svjetla progutane crnom rupom, onda one ne bi mogle biti na granici crne rupe.

Dakle, zrake svjetla na horizontu događaja moraju se gibati paralelno ili udaljavati jedna od druge.

Drugi način promatranja iste stvari bio bi taj da je horizont događaja, granica crne rupe, nalik na rub sjene. Rub svjetla bježi na veliku udaljenost, ali, jednako tako, rub sjene ne može umaći svojoj sudbini. A ako pogledate sjenu koju baca izvor s velike udaljenosti, kao što je naše Sunce, vidjet ćete da zrake svjetla na rubu ne prilaze jedne drugima. Ako zrake svjetla koje tvore horizont događaja, granicu crne rupe, ne mogu nikada prići jedne drugima, područje horizonta događaja može ostati isto ili se s vremenom povećavati. Nikad se ne može smanjivati, jer bi to značilo da barem neke od zraka svjetla u granici moraju prići jedne drugima. U stvari, to područje bi se povećalo svaki put kad neka materija ili zračenje upadne u crnu rupu.

Također, pretpostavimo da se dvije crne rupe sudare i spoje tvoreći jednu crnu rupu. Tada bi područje horizonta događaja konačne crne rupe bilo veće od zbroja područja horizonata događaja izvornih crnih rupa. Svojstvo neopadanja područja horizonta događaja postavlja važno ograničenje mogućem ponašanju crnih rupa. Bio sam tako uzbuđen svojim otkrićem da nisam puno spavao te noći.

Sljedećeg dana nazvao sam Rogera Penrosea. On se složio sa mnom. U stvari mislim da je već bio svjestan tog svojstva područja. Međutim, on je koristio malo drugačiju definiciju crne rupe. Nije shvatio da će granice crne rupe prema objema definicijama biti iste, pod uvjetom da se crna rupa smirila u stabilnom stanju.

Drugi zakon termodinamike

Ponašanje područja crnih rupa, s njihovim svojstvom neopadanja, veoma podsjeća na ponašanje fizičke kvantitete zvano entropija, kojom se mjeri stupanj nereda u

sustavu. I prema svakodnevnom iskustvu znamo da nered ima tendenciju povećati se ako stvari prepustimo njima samima; da biste to vidjeli, trebate samo prestati popravljati po kući. Možemo napraviti red iz nereda – na primjer, možemo oličiti kuću. No, to zahtijeva utrošak energije, i time smanjuje količinu dostupne uređene energije.

Precizan izrijek te ideje poznat je kao drugi zakon termodinamike. On kaže da se entropija nekog izoliranog sustava nikad ne smanjuje s vremenom. Štoviše, kad se dva sustava spoje, entropija združenih sustava veća je od zbroja entropija individulanih sustava. Primjerice, uzmimo sustav molekula plina u kutiji. Molekule se mogu zamisliti kao malene biljarske kugle koje se stalno sudaraju jedne s drugima i odskakuju o stijenke kutije. Pretpostavimo da su u početku sve molekule uz pomoć pregrade bile ograničene na lijevu stranu kutije. Uklonimo li pregradu, molekule će imati tendenciju da se prošire na okolni prostor i zapreme obje polovine kutije. U nekom kasnijem trenutku one se mogu, slučajno, sve naći na desnoj strani ili ponovno na lijevoj strani. Međutim, daleko je veća vjerojatnost da će biti otprilike isti broj molekula na obje polovine. Takav poredak je manje uređen, ili više neuređen, od početnoga stanja u kojem su sve molekule bile na jednoj polovini. Zbog toga kažemo da je entropija plina porasla.

Na sličan način, možemo zamisliti da počinjemo s dvije kutije, pri čemu jedna sadrži molekule kisika, a druga molekule dušika. Spojimo li kutije i uklonimo stijenku koja ih odjeljuje, molekule kisika i dušika počet će se miješati. Nešto kasnije, najvjerojatnije stanje bit će potpuno ravnomjerna mješavina molekula kisika i dušika u čitavoj zapremnini spojenih dviju kutija. To stanje bit će manje uređeno, i prema tome imati više entropije, nego početno stanje u dvije odvojene kutije.

Drugi zakon termodinamike ima prilično drukčiji status nego ostali zakoni znanosti. Drugi zakoni, kao što je primjerice Newtonov zakon gravitacije, apsolutni su zakoni – to znači da uvijek vrijede. S druge strane, drugi zakon termodinamike je statistički zakon – to znači da ne vrijedi uvijek, nego samo u golemoj većini slučajeva. Vjerojatnost da će se sve molekule u našoj kutiji u nekom kasnijem trenutku naći na jednoj polovini kutije iznosi mnogo milijuna milijuna naspram jedan, ali može se dogoditi.

No, ako na umu imamo crnu rupu, čini se da tu postoji prilično lak način kršenja drugog zakona: samo bacite neku materiju s puno entropije, kao što je primjerice kutija plina, niz crnu rupu. Ukupna entropija materije izvan crne rupe će opasti. Mogli bismo, naravno, i dalje tvrditi da ukupna entropija, uključujući entropiju unutar crne rupe, neće opasti. Ali budući da ne postoji način da pogledamo u crnu rupu, ne možemo vidjeti koliko entropije ima materija u njoj. Bilo bi lijepo, stoga, da postoji neka osobina na crnoj rupi po kojoj bi promatrač izvana mogao procijeniti njezinu unutarnju entropiju; ona bi se morala povećati kad god materija koja sadrži entropiju padne u crnu rupu.

Slijedom mog otkrića da se područje horizonta događaja povećava svaki put kad materija upadne u crnu rupu, istraživač s Princetona po imenu Jacob Bekenstein predložio je tezu prema kojoj je područje horizonta događaja mjera entropije crne rupe. Kad materija koja nosi entropiju padne u crnu rupu, područje horizonta događaja se povećava, tako da se zbroj entropija materije s vanjske strane crne rupe i područje horizonta događaja nikada ne smanjuju.

Čini se da taj prijedlog u većini situacija sprječava kršenje drugog zakona termodinamike. Međutim, sadrži jedan fatalan nedostatak: ako crna rupa ima entropiju, tada

mora također imati i temperaturu. A tijelo s temperaturom različitom od nule mora u određenoj mjeri emitirati zračenje. Znamo iz svakodnevnog iskustva da će žarač, ako ga zagrijemo u vatri, isijavati crvenim sjajem i odašiljati zračenje. Međutim, i tijela na nižim temperaturama odašilju zračenja; jedino što ih obično ne primjećujemo jer je riječ o prilično maloj količini.

Zračenje je nužno kako bi se spriječilo kršenje drugog zakona. Tako crne rupe moraju emitirati zračenje, ali prema samoj njihovoj definiciji, crne rupe su objekti koji ne bi trebali ništa emitirati. Zbog toga, čini se, područje horizonta događaja crne rupe ne može se promatrati kao njezina entropija.

U stvari, 1972. sam napisao rad na tu temu, zajedno s Brandonom Carterom i jednim američkim kolegom, Jimom Bardeenom. Zaključili smo kako, mada postoje brojne sličnosti između entropije i područja horizonta događaja, postoji i ta očito fatalna teškoća. Moram priznati da me je na pisanje tog rada dijelom motiviralo i to što me uzrujao Bekenstein, jer sam smatrao da je zloupotrijebio moje otkriće o povećanju područja horizonta događaja. No, na kraju se pokazalo da je zapravo bio u pravu, mada na način na koji on to sigurno nije očekivao.

Zračenje crne rupe

U rujnu 1973., tijekom posjeta Moskvi, razgovarao sam o crnim rupama s dva vodeća ruska stručnjaka, Yakovom Zeldovichem i Alexanderom Starobinskyjem. Uvjerili su me da bi, prema načelu neodređenosti kvantne mehanike, rotirajuće crne rupe trebale stvarati i emitirati čestice. Vjerovao sam njihovim argumentima temeljenim na fizici, ali nije mi se svidio matematički način na koji su izračunali emisiju. Stoga sam prionuo na razvijanje boljeg

matematičkog pristupa, koji sam predstavio na neformalnom seminaru na Oxfordu krajem studenog 1973. U to vrijeme nisam imao izračune kojima bih otkrio koliko bi zapravo bilo emitirano. Očekivao sam kako ću otkriti samo zračenje koje su Zeldovich i Starobinsky predvidjeli kod rotirajućih crnih rupa. Međutim, kada sam obavio izračunavanja, otkrio sam, na svoje iznenađenje i nezadovoljstvo, da čak i nerotirajuće crne rupe trebaju stvarati i stabilnom brzinom emitirati čestice.

Isprva sam pomislio kako to zračenje ukazuje na to da jedna od aproksimacija koje sam koristio nije valjana. Bojao sam se da će Bekenstein, ako dozna što sam otkrio, to upotrijebiti kao dodatni argument kako bi podržao svoje zamisli o entropiji crnih rupa, koje mi se i dalje nisu sviđale. Međutim, što sam više razmišljao o tome, sve mi se više činilo da aproksimacije moraju biti valjane. Ali ono što me konačno uvjerilo u to da je emisija stvarna, bilo je to što je spektar emitiranih čestica bio upravo onakav kakav bi trebalo emitirati vruće tijelo.

Crna rupa emitirala je čestice u točno preciznom omjeru potrebnom da spriječi kršenje drugog zakona.

Otada, izračunavanja su ponovili mnogi ljudi, u brojnim različitim oblicima. Svi su potvrdili da crna rupa mora emitirati čestice i zračenje kao da jest vruće tijelo s temperaturom koja ovisi jedino o masi crne rupe: što je masa veća, temperatura je manja. Možemo to zračenje razumjeti na sljedeći način: ono što smatramo praznim prostorom nije potpuno prazno jer bi to značilo da sva polja, kao što su gravitacijsko polje i elektromagnetsko polje, moraju biti točno nula. Međutim, vrijednost polja i brzina njegove promjene u vremenu podsjećaju na položaj i ubrzanje čestice. Načelo neodređenosti implicira da što točnije znamo jednu od tih kvantiteta, tim manje točno možemo znati drugu.

Tako u praznom prostoru polje ne može biti fiksirano točno na nuli, jer tada bi imalo i preciznu vrijednost, nula, i preciznu brzinu promjene, također nula. Umjesto toga, mora postojati određena minimalna količina nesigurnosti, ili kvantne fluktuacije, u vrijednosti polja. Možemo o tim fluktuacijama misliti kao o parovima čestica svjetla ili gravitacije koji se katkad zajedno javljaju, razdvajaju, pa ponovno spajaju i međusobno anuliraju. Te čestice se nazivaju virtualnim česticama. Za razliku od stvarnih čestica, ne mogu se izravno promatrati pomoću detektora čestica. Ipak, njihovi indirektni učinci, kao što su male promjene u energiji elektronskih orbita i atoma, mogu se izmjeriti i uskladiti s teoretskim predviđanjima, i to u izuzetno visokom stupnju točnosti.

Zbog očuvanja energije, jedan od partnera u paru virtualnih čestica imat će pozitivnu energiju, a drugi partner će imati negativnu energiju. Onaj s negativnom energijom osuđen je na kratkotrajan život virtualne čestice. Tako je zato što stvarne čestice u normalnim situacijama uvijek imaju pozitivnu energiju. Stoga on mora tražiti svog partnera i poništiti ga. Međutim, gravitacijsko polje unutar crne rupe toliko je jako da u njemu čak i stvarne čestice mogu imati negativnu energiju.

Stoga je moguće, ako je riječ o crnoj rupi, da virtualna čestica s negativnom energijom padne u crnu rupu i postane stvarna čestica. U tom slučaju ona ne mora više poništiti svog partnera; njezin ostavljeni partner i sam može pasti u crnu rupu. Ali zato što ima pozitivnu energiju, on također može pobjeći u beskonačnost kao stvarna čestica. Promatraču iz daljine to će se učiniti kao da je emitiran iz crne rupe. Što je crna rupa manja, tim manje će čestica s negativnom energijom morati putovati prije no što postane stvarnom česticom. Tako će i brzina emitiranja biti veća, a prividna temperatura crne rupe bit će viša.

Pozitivna energija otpuštenog zračenja bit će uravnotežena protokom negativno nabijenih čestica u crnu rupu. Prema slavnoj Einsteinovoj formuli $E=mc^2$, energija je ekvivalentna masi. Protok negativne energije u crnu rupu stoga reducira njezinu masu. Kad crna rupa gubi masu, područje njezina horizonta događaja se smanjuje, ali to opadanje u entropiji crne rupe više je nego nadoknađeno entropijom emitiranog zračenja, te drugi zakon nikada nije prekršen.

Eksplozije crne rupe

Što je masa crne rupe manja, to je veća njezina temperatura. Tako, dok crna rupa gubi masu, njezina temperatura i brzina zračenja rastu. Stoga ona brzo gubi masu. Nije posve jasno što se događa kada masa crne rupe postane ekstremno mala. Najrazumnije je pretpostaviti da će potpuno nestati u strahovitom završnom prasku emisije, jednakom eksploziji milijuna atomskih bombi.

Crna rupa mase nekoliko puta veće od Sunčeve imala bi temperaturu od samo deset milijuntinki stupnja iznad apsolutne nule. To je mnogo manje od temperature mikrovalne radijacije koja ispunjava svemir, oko 2,7 stupnjeva iznad apsolutne nule – tako bi takve crne rupe dale manje nego što apsorbiraju, iako bi i to bilo vrlo malo. Ako je sudbina svemira da se zauvijek širi, temperatura mikrovalne radijacije na kraju će opasti na temperaturu manju no što je ima takva crna rupa. Rupa će onda apsorbirati manje nego što emitira i počet će gubiti masu. Ali, čak i tada, njezina je temperatura tako niska da bi moralo proći oko 10^{66} godina prije no što u potpunosti ispari. To je mnogo dulje od starosti svemira, koji ima samo oko 10^{10} godina.

S druge strane, kako smo doznali iz prošlog predavanja, moguće je da postoje primordijalne crne rupe s mnogo

manjom masom, nastale kolapsom nepravilnosti tijekom vrlo ranih razdoblja svemira. Takve crne rupe imale bi mnogo višu temperaturu i emitirale bi zračenje mnogo većom brzinom. Primordijalna crna rupa s početnom masom od tisuću milijuna tona imala bi životni vijek otprilike jednak dobi svemira. Primordijalne crne rupe s početnom masom manjom od ove dosad bi već u potpunosti isparile. No, one s malo većom masom i dalje bi emitirale zračenje u obliku X-zraka i gama-zraka. One su poput valova svjetlosti, samo s mnogo kraćom valnom duljinom. Takve rupe teško da zaslužuju epitet crnih. One su zapravo bijelo usijanje, i emitiraju energiju od oko deset tisuća megavata.

Jedna takva crna rupa mogla bi pokretati deset velikih električnih centrala, samo kad bismo mogli ukrotiti to što iz nje izlazi. No, to bi bilo poprilično teško. Crna rupa bi imala masu planine komprimirane na veličinu jezgre jednog atoma. Da stavite jednu takvu crnu rupu na površinu Zemlje, ne bi je bilo moguće zaustaviti da ne propadne kroz pod sve do središta Zemlje. Ona bi oscilirala kroz Zemlju i natrag, dok se konačno ne bi smirila u središtu. Tako da bi jedino mjesto na koje bismo mogli staviti takvu crnu rupu, i s kojeg bi se mogla koristiti energija što je emitira, bilo u orbiti Zemlje. A jedini način da je stavimo u orbitu Zemlje bio bi da je tamo odvučemo tegleći pred njom golemu masu, otprilike kao mrkvu pred magarcem. To ne zvuči kao osobito praktičan prijedlog, bar ne u skoroj budućnosti.

Potraga za primordijalnim crnim rupama

Ali čak i ako ne možemo iskoristiti emisiju iz tih primordijalnih crnih rupa, kakve su nam šanse da ih promatramo? Možemo tražiti gama-zrake koje primordijalne crne rupe

emitiraju tijekom većeg dijela svojeg života. Iako bi zračenje iz većine njih trebalo biti vrlo slabo jer su daleko, ukupni zbroj zračenja koje dopire od svih njih možda bi se mogao otkriti. Mi doista primjećujemo takvu pozadinu sačinjenu od gama-zraka. Međutim, ta pozadina je vjerojatno nastala uslijed nekih drugačijih procesa, a ne od primordijalnih crnih rupa. Moglo bi se reći da promatranja pozadinskog gama zračenja ne pružaju konkretan dokaz za primordijalne crne rupe. Ali ona nam govore da, u prosjeku, ne može biti više od tri stotine malih crnih rupa u svakoj kubičnoj svjetlosnoj godini u svemiru. To ograničenje znači da primordijalne crne rupe mogu činiti najviše jednu milijuntinu prosječne gustoće tvari u svemiru.

Budući da su primordijalne crne rupe toliko rijetke, moglo bi se činiti nevjerojatnim da će postojati jedna baš dovoljno blizu nas kako bismo je mogli promatrati. No, budući da bi gravitacija morala privući primordijalnu crnu rupu prema bilo kojoj materiji, one bi morale biti mnogo više uobičajene u galaksijama. Da su, recimo, milijun puta više uobičajene u galaksijama, tada bi nam se najbliža crna rupa vjerojatno trebala nalaziti na udaljenosti od oko tisuću milijuna kilometara, ili otprilike jednako daleko kao što je Pluton, najdalji poznati planet. S te bi udaljenosti i dalje bilo vrlo teško otkriti stabilnu emisiju crne rupe, čak i da iznosi deset tisuća megavata.

Kako bismo promatrali primordijalnu crnu rupu, morali bismo detektirati nekoliko kvanta gama-zraka koji dolaze iz istog pravca u određenom vremenskom intervalu, kao što je tjedan.

Drugačije, oni bi mogli jednostavno biti dio pozadine. Ali Planckov kvantni princip nam govori da svaki kvant gama-zraka sadrži vrlo mnogo energije, jer gama-zrake imaju vrlo visoku frekvenciju. Tako da ni za količinu od deset tisuća megavata nije potrebno mnogo kvanata. A

da bismo promotrili tih nekoliko kvanta koji dolaze iz udaljenosti Plutona, trebao bi nam veliki detektor gama-zraka, veći od bilo kojeg dosad konstruiranog. K tome, detektor bi morao biti postavljen u svemiru, jer gama-zrake ne mogu probiti našu atmosferu.

Naravno, kad bi crna rupa koja bi nam bila blizu kao Pluton dosegnula kraj svog života i eksplodirala, bilo bi lako otkriti konačni prasak emisije. No, ako je crna rupa emitirala tijekom zadnjih deset do dvadeset tisuća milijuna godina, šanse da će dovršiti svoj život u roku od sljedećih nekoliko godina stvarno su prilično male. To bi se isto tako moglo dogoditi i nekoliko milijuna godina u prošlosti ili budućnosti. Dakle, kako biste imali razumnu šansu da vidite ekploziju prije nego što vam istekne istraživačka stipendija, morat ćete pronaći način da otkrijete bilo koje eksplozije unutar udaljenosti od oko jedne svjetlosne godine. I dalje ćete imati problem s nalaženjem velikog gama-detektora kako biste uočili nekoliko kvanta gama-zrake iz eksplozije. Međutim, u tom slučaju, neće biti potrebno odrediti da svi kvanti dolaze iz istog pravca. Bit će dovoljno uočiti da su svi pristigli unutar vrlo kratkog vremenskog intervala, kako biste bili uvjereni da su svi stigli od iste eksplozije.

Jedan detektor gama-zraka, koji je možda sposoban uočiti primordijalne crne rupe, jest čitava Zemljina atmosfera. (Nije baš vjerojatno da ćemo mi, u svakom slučaju, biti u stanju izgraditi veći detektor.) Kad visokoenergetski kvant gama-zrake udari u atome u našoj atmosferi, on stvara parove elektrona i pozitrona. Kad oni udare u druge atome, ovi pak stvaraju više parova elektrona i pozitrona. Tako dobivamo nešto što nazivamo tušem elektrona. Rezultat je oblik svjetla zvan Cerenkovo zračenje. Tako možemo otkriti plamsaje gama-zraka tražeći bljeskove svjetla na noćnom nebu.

Naravno, tu su i brojni drugi fenomeni, poput munja, primjerice, koji također proizvode bljeskove na nebu. Ipak, među takvim pojavama mi možemo razlikovati plamsaje gama-zraka promatrajući bljeskove istodobno s dviju ili više veoma udaljenih lokacija. Takvo istraživanje provela su dva znanstvenika iz Dublina, Neil Porter i Trevor Weekes, koristeći teleskope u Arizoni. Oni su otkrili brojne plamsaje, ali niti jedan koji bi se mogao definitivno pripisati plamsajima gama-zraka od primordijalnih crnih rupa.

Čak i ako se potraga za primordijalnim crnim rupama pokaže uzaludnom, kao što se čini da bi mogla biti, ona će nam ipak dati važne informacije o vrlo raznim fazama svemira. Ako je rani svemir bio kaotičan i nepravilan, ili ako je pritisak materije bio veoma nizak, trebali bismo očekivati da je proizveo mnogo više primordijalnih crnih rupa od broja određenog našim promatranjima pozadinskog gama-zračenja. Samo ako je rani svemir bio vrlo ravnomjeran i jednolik, i s velikim pritiskom, time bismo mogli objasniti brojčani nedostatak promotrivih crnih rupa.

Opća relativnost i kvantna mehanika

Zračenje iz crnih rupa bilo je prvi primjer predviđanja koje je ovisilo o obje velike teorije 20. stoljeća, općoj relativnosti i kvantnoj mehanici. U početku je pobuđivalo dosta protivljenja, jer je narušavalo postojeće gledište: »Kako bi crna rupa bilo što mogla emitirati?« Kad sam prvi put najavio rezultate svojih izračuna na konferenciji u laboratoriju Rutherford blizu Oxforda, bio sam dočekan s općom nevjericom. Pri kraju mog izlaganja voditelj konferencije, John G. Taylor s londonskog Kings Collegea, ustvrdio je kako su sve to besmislice. Čak je napisao i jedan rad kako bi to potkrijepio.

Ipak je na kraju većina, uključujući i Johna Taylora, došla do zaključka da crne rupe moraju isijavati poput vrućih tijela, ako su točne naše druge ideje o općoj relativnosti i kvantnoj mehanici. Tako, čak i ako još nismo uspjeli pronaći primordijalne crne rupe, postoji poprilična opća suglasnost da ako u tome uspijemo, one bi trebale emitirati mnogo gama i X-zraka. Ako nađemo bar jednu, ja ću dobiti Nobelovu nagradu.

Čini se da postojanje zračenja iz crnih rupa implicira da gravitacijski kolaps nije tako konačan i nepovratan kako smo nekoć mislili. Ako astronaut upadne u crnu rupu, njezina masa će se povećati. U konačnici, energetski ekvivalent te dodatne mase bit će vraćen svemiru u obliku radijacije. Tako će, u nekom smislu, astronaut biti recikliran. Doduše, bila bi to jadna vrsta besmrtnosti, jer bi bilo koji osobni koncept vremena za astronauta gotovo pouzdano došao svome kraju zajedno sa slomom njegove egzistencije u crnoj rupi. Čak bi i vrste čestica koje bi na kraju bile emitirane iz crne rupe bile općenito različite od onih koje su tvorile astronauta. Jedino svojstvo astronauta koje bi preživjelo bila bi njegova masa ili energija.

Aproksimacije koje sam koristio kako bih derivirao emisije iz crnih rupa trebale bi dobro funkcionirati u slučajevima kada crna rupa ima masu veću od djelića grama. Međutim, one bi se srušile na kraju života crne rupe, kad njezina masa postaje iznimno mala. Čini se da bi najvjerojatniji ishod bio taj da bi crna rupa naprosto nestala, barem iz naše regije svemira. Sa sobom bi odnijela i astronauta i bilo koju moguću singularnost koja je možda postojala unutar crne rupe. Bio je to prvi znak da bi kvantna mehanika mogla otkloniti singularnosti koje su predviđene klasičnom teorijom opće relativnosti. Međutim, metode kojima smo se i ja i drugi ljudi služili 1974. pri proučavanju kvantnih učinaka gravitacije nisu

bile u stanju odgovoriti na pitanja poput onoga bi li se singularnosti pojavile u kvantnoj gravitaciji.

Od 1975. nadalje, zbog toga sam počeo razvijati moćniji pristup kvantnoj gravitaciji, temeljen na Feynmanovoj ideji o zbroju povijesti. Odgovori koje taj pristup nudi o podrijetlu i sudbini svemira bit će opisani u sljedeća dva predavanja. Vidjet ćemo da kvantna mehanika dopušta svemiru da ima početak koji nije singularnost. To znači da se zakoni fizike ne moraju slomiti na podrijetlu svemira. Stanje svemira i svega što sadrži, među ostalim i nas, u potpunosti je određeno zakonima fizike, sve do granice koju postavlja načelo neodređenosti. Toliko o slobodnoj volji.

Peto predavanje
Podrijetlo i sudbina svemira

Tijekom 70-ih godina 20. stoljeća radio sam uglavnom na crnim rupama. No, 1981. ponovno mi se probudilo zanimanje za pitanja o podrijetlu svemira, nakon što sam bio na konferenciji o kozmologiji u Vatikanu. Katolička crkva je napravila gadnu grešku s Galilejem kad je pokušala ovladati znanošću, tvrdeći da Sunce kruži oko Zemlje. Sada, stoljećima kasnije, odlučila je kako je ipak bolje pozvati brojne stručnjake da je posavjetuju o kozmologiji.

Na kraju konferencije sudionicima je bio dopuštena audijencija kod pape. On nam je rekao kako je u redu proučavati evoluciju svemira nakon Velikog praska, ali da ne bismo trebali istraživati i sam Veliki prasak jer to je bio trenutak kreacije, pa prema tome i djelo Božje.

Tada mi je bilo drago što mu nije bila poznata tema o kojoj sam upravo govorio na konferenciji. Nisam imao ni najmanju želju dijeliti Galilejevu sudbinu, iako mi je on doista veoma drag, dijelom i zbog toga što sam rođen točno tri stotine godina nakon njegove smrti.

Model vrućeg Velikog praska

Kako bih objasnio o čemu je riječ u mojem radu, prvo ću opisati općeprihvaćenu povijest svemira, prema modelu koji je poznat kao »model vrućeg Velikog praska«. On podrazumijeva da je svemir opisan Friedmannovim

modelom, sve unatrag do Velikog praska. U takvim modelima otkrivamo da, dok se svemir širi, temperatura materije i radijacija u njemu opadaju. Budući da je temperatura jednostavno mjera prosječne energije čestica, to hlađenje svemira imat će veliki učinak na materiju u njemu. Pri veoma visokim temperaturama, čestice će se kretati uokolo takvom brzinom da će moći umaknuti bilo kojem međusobnom privlačenju, uzrokovanom nuklearnim ili elektromagnetskim silama. Ali kad su ohlađene, očekivali bismo da se čestice međusobno privlače i počnu se nakupljati jedna uz drugu.

U trenutku Velikog praska, svemir je imao nultu veličinu i prema tome je morao biti beskonačno vruć. No kako se svemir širio, temperatura zračenja se smanjivala. Jednu sekundu nakon Velikog praska trebala je pasti za oko deset tisuća milijuna stupnjeva. To je otprilike tisuću puta više od temperature u središtu našeg Sunca, ali ovako visoke temperature postižu se u eksplozijama atomske bombe. U to je vrijeme svemir sadržavao uglavnom fotone, elektrone, te neutrine i njihove antičestice, kao i nešto protona i neutrona.

Dok se svemir nastavljao širiti, a temperatura opadati, brzina kojom su se u sudarima stvarali elektroni i parovi elektrona morala je pasti ispod brzine pri kojoj bi bili uništeni međusobnim poništavanjem. Tako bi se većina elektrona i antielektrona međusobno poništila kako bi stvorila više fotona, ostavljajući za sobom samo nekoliko elektrona.

Oko stotinu sekundi nakon Velikog praska, temperatura se morala spustiti do jedne tisuće milijuna stupnjeva, što odgovara temperaturi unutar najvrućih zvijezda. Pri toj temperaturi, protoni i neutroni nemaju više dovoljno energije za bijeg od privlačnosti jake nuklearne sile. Oni se počinju međusobno spajati i stvarati jezgre atoma

deuterija, ili teškog vodika, koji sadrži jedan proton i jedan neutron. Jezgre deuterija potom bi se spajale s više protona i neutrona, tvoreći jezgre helija, koji sadrži dva protona i dva neutrona. Tu bi ostajalo također i nešto parova težih elemenata, litija i berilija. Možemo izračunati kako bi u modelu vrućeg Velikog praska otprilike četvrtina protona i neutrona morala biti pretvorena u jezgre helija, zajedno s malom količinom teškog vodika i drugih elemenata. Preostali neutroni raspali bi se u protone, koji su jezgre običnih atoma vodika. Te se pretpostavke vrlo dobro slažu s onim što se može vidjeti.

Model vrućeg Velikog praska također predviđa da bismo morali moći vidjeti radijaciju preostalu iz vrućih ranih razdoblja. Međutim, zbog širenja svemira temperatura bi morala biti smanjena do samo nekoliko stupnjeva iznad apsolutne nule.

To je objašnjenje mikrovalnog pozadinskog zračenja koje su otkrili Penzias i Wilson 1965. godine. Stoga smo prilično uvjereni da baratamo pravom slikom, barem kad je riječ o vremenskom razdoblju oko jedne sekunde nakon Velikog praska. Nakon samo nekoliko sati od Velikog praska, proizvodnja helija i drugih elemenata morala se zaustaviti. A nakon toga, tijekom otprilike sljedećih milijun godina, svemir se trebao samo nastaviti širiti, bez ikakvih posebnih događaja. Konačno, jednom kad se temperatura snizila do nekoliko tisuća stupnjeva, elektroni i jezgre nisu više imali dovoljno energije da nadvladaju međusobno elektromagnetsko privlačenje. Tada su se morali početi spajati tvoreći atome.

Svemir se, kao cjelina, nastavio širiti i hladiti. Međutim, u područjima koja su bila neznatno gušća od prosjeka, širenje je moralo biti usporeno dodatnom gravitacijskom privlačnošću. To bi u konačnici zaustavilo širenje u nekim područjima i dovelo do toga da ta područja počnu kolabirati

u same sebe. Dok kolabiraju, gravitacijski pritisak mase izvan tih područja mogao ih je navesti da počnu polako rotirati. Kad bi kolabirajuće područje postalo manje, počelo bi se brže okretati – baš kao što se klizači na ledu brže okreću kad uvuku ramena i privuku ruke uz tijelo. Na kraju, kad bi područje postalo dovoljno maleno, vrtjelo bi se dovoljno brzo da uravnoteži privlačnost gravitacije. Na taj način, rođene su diskolike rotirajuće galaksije.

Kako je vrijeme prolazilo, plin se u galaksijama razdvajao na manje oblake koji su kolabirali pod vlastitom gravitacijom. Dok su se skupljali, temperatura plina se povećavala sve dok ne bi postala dovoljno visoka da pokrene nuklearne reakcije. One su pretvarale vodik u više helija, a otpuštena vrućina podizala je pritisak i time priječila oblacima daljnje skupljanje. Oni su ostajali u takvom stanju dugo vremena, kao zvijezde nalik našem Suncu, izgarajući vodik u helij i isijavajući energiju u obliku topline i svjetla.

Masivnije zvijezde morale su biti vruće kako bi uravnotežile svoju jaču gravitacijsku privlačnost. Zbog toga su se reakcije nuklearne fuzije nastavljale toliko mnogo brže da su one svoj vodik trošile u roku tako kratkom kao što je stotinu milijuna godina. Tada bi se malo skupile i, budući da bi se time dodatno zagrijale, počele bi pretvarati helij u teže elemente kao što su ugljik ili kisik. To, međutim, nije oslobađalo mnogo više energije, te bi se javila kriza, kao što sam opisao u svom predavanju o crnim rupama.

Nije posve jasno što se kasnije događalo, ali čini se vjerojatnim da bi središnje regije zvijezde kolabirale u vrlo gusto stanje, kakvo je neutronska zvijezda ili crna rupa. Vanjske regije zvijezde možda su bile raspršene u strahovitim eksplozijama zvanim supernove, koje bi sjajem zaklonile sve druge zvijezde u galaksiji. Neki od težih elemenata proizvedenih potkraj zvijezdina života bili bi

u obliku plina izbačeni natrag u galaksiju. Oni bi pružili nešto sirovine za sljedeću generaciju zvijezda.

Naše vlastito Sunce sadrži oko dva posto tih težih elemenata jer je ono druga – ili treća – generacija zvijezda. Formirano je prije nekih pet tisuća milijuna godina od oblaka rotirajućeg plina koji je sadržavao ostatke ranijih supernova. Većina plina iz tog oblaka potrošila se na stvaranje Sunca ili je odbačena u svemir. Kako god bilo, male količine težih elemenata združile su se kako bi oblikovale tijela koja sad kruže oko Sunca kao planeti, poput Zemlje.

Otvorena pitanja

Ta slika svemira koji je započeo kao vrlo vruć te se hladi i širi u skladu je sa svim dokazima dobivenim opažanjem. Ipak, ona brojna važna pitanja ostavlja bez odgovora. Prvo, zašto je rani svemir bio toliko vruć?

Drugo, zašto je svemir na velikoj skali tako jednolik– zašto izgleda jednako bez obzira na to s koje točke i u kojem ga smjeru gledali?

Treće, zašto je svemir započeo toliko blizu kritičnoj brzini širenja, upravo tolikoj da umalo izbjegne rekolaps? Da je brzina širenja u prvoj sekundi nakon Velikog praska bila manja samo za jedan kroz stotinu tisuća milijuna milijuna, svemir bi bio rekolabirao prije nego što bi uopće dosegao svoju sadašnju veličinu.

S druge strane, da je brzina širenja u toj sekundi bila jednako toliko veća, svemir bi se proširio do te mjere da bi sada bio zapravo posve prazan.

Četvrto, unatoč činjenici da je svemir tako jednolik i homogen kad se gleda u cjelini, on sadrži lokalne nakupine kao što su zvijezde i galaksije. Za njih se smatra da su se razvile od malih nejednakosti u gustoći ranog svemira,

koja je varirala od jedne regije do druge. Koje je podrijetlo tih fluktuacija u gustoći? Opća teorija relativnosti, sama za sebe, ne može objasniti te pojave ni odgovoriti na ova pitanja. To je stoga jer ona pretpostavlja da je svemir započeo s beskonačnom gustoćom u singularnosti Velikog praska. Pri singularnosti, opća relativnost i svi drugi zakoni fizike se slamaju. Ne može se predvidjeti što bi izašlo iz singularnosti. Kako sam ranije objasnio, to znači da iz teorije možemo mirno izbaciti sve događaje koji su prethodili Velikom prasku, jer oni ne bi imali učinka na ono što mi promatramo. Prostor-vrijeme bi imalo granicu – početak s Velikim praskom. Zašto bi svemir započeo s Velikim praskom upravo na takav način da to dovede do stanja koje vidimo danas? Zašto je svemir toliko jednolik i kako to da se širi upravo tolikom brzinom da izbjegne rekolaps? Bolje bismo se osjećali u vezi s tim kad bismo mogli pokazati da je priličan broj različitih inicijalnih konfiguracija morao biti razvijen da bi proizveo svemir kakav mi vidimo.

U tom slučaju, svemir razvijen iz neke vrste slučajnih inicijanih uvjeta trebao bi sadržati brojne regije koje izgledaju ovako kako ih vidimo. Mogle bi također postojati regije koje su veoma drugačije. Međutim, te regije vjerojatno ne bi bile prikladne za formiranje galaksija i zvijezda. One su osnovni preduvjeti za razvitak inteligentnog života, barem ovakvog kakvog poznajemo. Stoga, te regije ne bi sadržavale nikakva bića koja bi uočila da su one drugačije.

Kad razmišljamo o kozmologiji, moramo uzeti u obzir selektivno načelo prema kojemu živimo u regiji svemira pogodnoj za inteligentni život. Ta prilično očita i elementarna okolnost katkad se naziva antropičnim načelom. Pretpostavimo, s druge strane, da je inicijalno stanje svemira moralo biti ekstremno pažljivo odabrano kako bi dovelo do nečeg kao što je ovo što vidimo oko sebe. U

tom bi se slučaju smatralo nevjerojatnim da svemir sadrži i jednu regiju u kojoj se život može pojaviti.

U modelu vrućeg Velikog praska koji sam ranije opisao, u ranom svemiru nije bilo dovoljno vremena da se vrućina izlije iz jedne regije u drugu. To znači da su različite regije svemira morale započeti s točno istom temperaturom, s obzirom na činjenicu da mikrovalna pozadina ima istu temperaturu u kojem god smjeru je mi mjerili. Također, početna brzina širenja morala je biti izabrana veoma precizno da svemir do sada ne bi rekolabirao. To znači da je inicijalno stanje svemira svakako moralo biti veoma pažljivo odabrano, ako je točan model vrućeg Velikog praska. Bilo bi veoma teško objasniti zašto je svemir trebao početi baš na takav način, osim u slučaju da to jest djelo Boga koji je namjeravao stvoriti bića poput nas.

Inflacijski model

Kako bi izbjegao takve teškoće s vrlo ranim fazama modela vrućeg Velikog praska, Alan Guth s Instituta za tehnologiju Massachusettsa iznio je novi model. U njemu su mnoge različite inicijalne konfiguracije mogle biti razvijene u nešto poput sadašnjeg svemira. On sugerira da je rani svemir mogao imati razdoblje vrlo brzog, ili eksponencijalnog, širenja. Za takvo širenje kaže se da je inflacijsko – prema analogiji s inflacijom cijena koja se javlja u većoj ili manjoj mjeri u svakoj državi. Svjetski rekord u inflaciji cijena vjerojatno se dogodio u Njemačkoj nakon Prvog svjetskog rata, kad je cijena jednog kruha tijekom nekoliko mjeseci s manje od jedne marke skočila na više milijuna maraka. Ali inflacija za koju mislimo da se mogla pojaviti u veličini svemira bila je mnogo većih razmjera čak i od toga – milijun milijuna milijuna milijuna milijuna puta u jednom sićušćnom djeliću sekunde. Naravno, sve je to bilo prije sadašnje vlade.

Guth je sugerirao da je svemir započeo iz Velikog praska na vrlo visokoj temperaturi. Očekivali bismo da bi pri tako visokim temperaturama jake i slabe nuklearne sile i elektromagnetska sila sve bile objedinjene u jednu silu. Dok se svemir širio, on se hladio, a čestice energije su opadale. Konačno bi nastupila takozvana faza tranzicije, i simetrija među silama bila bi narušena. Jake sile postale bi drugačije od slabih i od elektromagnetske sile. Jedan posve običan primjer faze tranzicije pruža smrzavanje vode. Tekuća voda je simetrična, ista u svakoj točki i u svakom smjeru. Međutim, kad se stvaraju kristali leda, oni zauzimaju određene pozicije i svrstavaju se u određeni poredak u nekom smjeru. To narušava simetriju vode.

U slučaju vode, ako smo jako pažljivi, možemo je »superohladiti«. To znači, možemo smanjiti temperaturu ispod točke smrzavanja – 0°C – a da se led ne formira. Guth je sugerirao da se svemir možda ponašao na sličan način: temperatura je možda pala ispod kritične vrijednosti, a da simetrija među silama nije bila narušena. Ako se to dogodilo, svemir bi bio u nestabilnom stanju, s više energije nego u slučaju da je simetrija narušena. Za tu posebnu, dodatnu energiju može se pokazati da ima antigravitacijski učinak. Ona bi se ponašala baš kao kozmološka konstanta.

Einstein je kozmološku konstantu uveo u opću relativnost kad je pokušavao konstruirati statični model svemira. Ipak, u tom slučaju, svemir bi se već bio širio. Odbojni efekt te kozmološke konstante tako bi tjerao svemir da se širi sve većom brzinom. Čak i u područjima u kojima bi čestica materije bilo više od prosjeka, gravitacijska privlačnost materije bila bi nadvladana repulzijom zbog učinka kozmološke konstante. Tako bi se ta područja također širila sve brže, na inflacijski način.

Kako se svemir širi, čestice materije se sve više udaljavaju. U svemiru koji se tako širi jedva da bi preostale ikakve

čestice. I dalje bi bio u superohlađenom stanju, u kojem simetrija među silama nije narušena. Bilo kakve nepravilnosti u svemiru bile bi jednostavno izglađene širenjem, kao što se nabori na balonu izravnaju kad se on napuše. Tako, sadašnje ravnomjerno i jednoliko stanje svemira moglo bi biti razvijeno iz mnogo različitih nejednolikih inicijalnih stanja. Brzina širenja također bi imala tendenciju prema upravo kritičnoj brzini nužnoj da se izbjegne rekolaps.

Dapače, ideja o inflaciji mogla bi također objasniti zašto u svemiru ima toliko materije. Postoji oko 10^{80} čestica u području svemira koje možemo promatrati. Odakle su sve one došle?

Prema kvantnoj teoriji, odgovor je u tome da se čestice mogu stvoriti od energije u obliku parova čestica/antičestica. Ali to samo postavlja pitanje odakle je došla energija. Odgovor glasi da ukupna energija svemira iznosi točno nulu. Materija u svemiru načinjena je od pozitivne energije. Međutim, sva materija se međusobno privlači gravitacijom. Dva komada materije koji su blizu jedan drugome imaju manje energije nego što bi ih ista takva dva komada imala da su međusobno veoma udaljena. Tako je zbog toga što morate potrošiti energiju da biste ih razdvojili. Morate se opirati gravitacijskoj sili koja ih privlači. Tako, na neki način, gravitacijsko polje ima negativnu energiju. U slučaju čitavog svemira, možemo pokazati da ta negativna gravitacijska energija točno poništava pozitivnu energiju materije. Tako je ukupna energija svemira nula.

E sad, dva puta nula i dalje je nula. Stoga, svemir može udvostručiti količinu pozitivne energije materije i također udvostručiti negativnu energiju gravitacije bez kršenja zakona o očuvanju energije. To se ne događa u normalnom širenju svemira u kojem gustoća materijalne energije opada s povećavanjem svemira. To se događa, međutim, u inflacijskom širenju, jer gustoća energije u superohlađenom stanju

ostaje konstantna dok se svemir širi. Kad svemir udvostruči veličinu, i pozitivna materijalna energija i negativna gravitacijska energija udvostručuju se, pa ukupna energija i dalje ostaje nula. Tijekom inflacijske faze, svemir u velikoj mjeri povećava svoju veličinu. Tako i ukupni iznos energije dostupne za tvorbu čestica postaje veoma velik. Kako je Guth primijetio: »Kaže se kako ništa nije besplatno. Ali svemir je ultimativna besplatna stvar.«

Kraj inflacije

Svemir se danas ne širi na inflacijski način. Prema tome, morao je postojati neki mehanizam koji bi eliminirao veoma široki utjecaj kozmološke konstante. To bi promijenilo brzinu širenja od ubrzavajuće do one koja je usporena gravitacijom, kakvu imamo danas. Dok se svemir širio i hladio, mogli bismo očekivati da će na kraju i simetrija među silama biti narušena, baš kao što se i superohlađena voda uvijek na kraju smrzne. Dodatna energija proizvedena stanjem nenarušene simetrije tada bi bila otpuštena i ponovno bi zagrijala svemir. Tada bi se svemir nastavio širiti i hladiti, baš kao u modelu vrućeg Velikog praska. No, u tom slučaju bismo sada imali objašnjenje zbog čega se svemir širio točno kritičnom brzinom i zašto različite regije imaju istu temperaturu.

Prema Guthovom izvornom prijedlogu, tranzicija koja je narušila simetriju trebala se javiti naglo, prilično nalik na pojavu kristala leda u vrlo hladnoj vodi. Zamisao se sastojala u tome da bi se »mjehurići« nove faze narušene simetrije oblikovali još u staroj fazi, poput mjehurića pare okružene ključajućom vodom.

Mjehurići bi se trebali širiti i međusobno susretati sve dok čitav svemir ne uđe u novu fazu. Problem je bio u tome, kako smo istaknuli i ja i nekoliko drugih ljudi, što se svemir širio tako brzo da bi se mjehurići prebrzo odmaknuli

jedan od drugog, tako da se ne bi mogli nikada združiti. Svemir bi ostao u vrlo nejednolikom stanju, pri čemu bi u nekim regijama bila očuvana simetrija među različitim silama. Takav model svemira ne bi se poklapao s onim što mi sada vidimo.

U listopadu 1981. otišao sam u Moskvu na konferenciju o kvantnoj gravitaciji. Nakon konferencije, održao sam seminar na Astronomskom institutu Sternberg o inflacijskom modelu i njegovim problemima. U publici je bio mladi Rus, Andrei Linde. On je rekao kako bi se teškoća s mjehurićima koji se ne susreću mogla izbjeći ako su mjehurići veoma veliki. U tom slučaju, naše područje svemira moglo bi se nalaziti unutar jednog velikog mjehura. Kako bi to funkcioniralo, promjena iz simetrije u narušenu simetriju morala bi se dogoditi veoma polako unutar mjehura, ali to je prilično moguće prema velikim objedinjujućim teorijama. Lindeova ideja o polaganom narušavanju simetrije bila je jako dobra, ali naglasio sam da bi njegovi mjehurići morali biti veći od samog svemira u to vrijeme. Pokazao sam da bi se umjesto toga simetrija morala narušiti posvuda u isto vrijeme, a ne samo unutar mjehurića. To bi vodilo do jednolikog svemira kakvog i vidimo. Model polaganog narušavanja simetrije bio je dobar pokušaj da se objasni zašto je svemir ovakav kakav jest. Međutim, i ja i nekoliko drugih ljudi pokazali smo da taj model predviđa puno veće varijacije u pozadinskom mikrovalnom zračenju nego što je uočeno. Također, kasniji rad bacio je sumnju u to bi li u ranom svemiru mogla postojati prava vrsta fazne tranzicije. Bolji model, nazvan modelom kaotične inflacije, uveo je Linde 1983. On ne ovisi o faznim tranzicijama, i može nam dati točan razmjer varijacija u mikrovalnoj podlozi. Inflacijski model pokazao je da je sadašnje stanje svemira moglo nastati od prilično velikog broja različitih inicijalnih konfiguracija. Ne može

se dogoditi, međutim, da bi svaka inicijalna konfiguracija morala dovesti do svemira poput ovog koji vidimo. Tako nam čak ni inflacijski model ne govori zašto su inicijalni uvjeti bili baš takvi da proizvedu to što vidimo. Moramo li se okrenuti antropičnom načelu kako bismo potražili objašnjenje? Je li to sve bila tek puka slučajnost?

To bi se činilo kao utjeha očajnika, negacija svih naših nada u razumijevanje unutarnjeg ustrojstva svemira.

Kvantna gravitacija

Kako bismo pokušali točno zamisliti kako je svemir započeo, potrebni su nam zakoni koji su vrijedili u početku vremena. Ako je točna klasična teorija opće relativnosti, teorem o singularnosti pokazao je da bi početak vremena morao biti točka beskonačne gustoće i zakrivljenosti. Svi poznati zakoni znanosti slomili bi se u takvoj točki. Mogli bismo pretpostaviti da postoje neki drugačiji zakoni koji vrijede za singularnost, no bilo bi veoma teško čak i formulirati zakone u točkama koje se tako loše ponašaju, a pritom još ne bismo imali ni vodstvo promatranja. Međutim, teoremi o singularnosti doista ukazuju na to da gravitacijska sila postaje tako jaka da kvantni gravitacijski učinci postaju važni: klasična teorija nije više dobar opis svemira. Tako moramo koristiti kvantnu teoriju gravitacije kako bismo raspravljali o vrlo ranim fazama svemira. Kao što ćemo vidjeti, u kvantnoj teoriji je moguće održanje običnih fizikalnih zakona u svakoj situaciji, pa i na početku vremena. Nije nužno postulirati nove zakone za singularnost, jer u kvantnoj teoriji nema potrebe ni za kakvom singularnošću.

Još nemamo cjelovitu i konzistentnu teoriju koja bi spojila kvantnu mehaniku i gravitaciju. Međutim, prilično smo sigurni u pogledu nekih osobina koje bi takva ujedinjujuća teorija morala imati. Jedna je da bi trebala

sadržavati Feynmanov prijedlog po kojemu se kvantna teorija formulira prema načelu zbroja povijesti. Prema tom pristupu, čestica koja putuje od A do B nema samo jednu povijest kako bi je imala u klasičnoj teoriji. Umjesto toga, pretpostavlja se da će ona slijediti sve moguće putanje u prostor-vremenu. Sa svakom od tih povijesti povezuje se par brojeva, jedan koji predstavlja veličinu vala i drugi koji predstavlja njezin položaj u krugu – njezinu fazu.

Vjerojatnost da će čestica, recimo, proći kroz neku određenu točku određuje se zbrajanjem valova povezanih sa svakom mogućom povijesti koja prolazi kroz tu točku. Međutim, kad pokušamo doista i izračunati te iznose, zapadamo u ozbiljne tehničke probleme. Možemo ih izbjeći jedino tako da slijedimo posebne naputke: moramo zbrojati valove povijesti čestice koji ne pripadaju realnom vremenu kakvo vi i ja doživljavamo u iskustvu, nego se odvijaju u imaginarnom vremenu.

Imaginarno vrijeme možda zvuči kao znanstvena fantastika, no to je u stvari dobro definiran matematički koncept. Kako bismo izbjegli tehničke poteškoće s Feynmanovim zbrojem povijesti, moramo koristiti imaginarno vrijeme. To ima zanimljiv učinak na prostor-vrijeme: razlika između vremena i prostora u potpunosti nestaje. Za prostor-vrijeme u kojem događaji imaju imaginarne vrijednosti na vremenskoj koordinati kaže se da je euklidsko jer je metrika pozitivno određena.

U euklidskom prostor-vremenu nema razlike između smjera vremena i smjera prostora. S druge strane, u stvarnom prostor-vremenu, u kojemu su događaji označeni stvarnim vrijednostima vremenske koordinate, lako je odrediti razliku. Smjer vremena leži unutar svjetlosnog konusa, a smjer prostora izvan njega. Imaginarno vrijeme možemo smatrati tek matematičkim oruđem – ili trikom – potrebnim za izračunavanje odgovora o stvarnom prostor-vremenu.

Međutim, moguće je da tu ima i nešto više. Moguće je da je euklidsko prostor-vrijeme fundamentalni koncept, a ono što mi smatramo stvarnim prostor-vremenom samo plod naše mašte.

Kad primijenimo Feynmanom zboj povijesti na svemir, analogija povijesti čestice sada je potpuno zakrivljeno prostor-vrijeme koje predstavlja povijest čitavog svemira. Zbog gore spomenutih tehničkih razloga, to zakrivljeno prostor-vrijeme mora se uzeti kao euklidsko. To znači, vrijeme je imaginarno i nemoguće ga je razlučiti od smjerova u prostoru. Kako bismo izračunali mogućnost pronalaženja stvarnog prostor-vremena s nekim sigurnim svojstvom, zbrajamo valove povezane sa svim povijestima imaginarnog vremena koji imaju takvo svojstvo. Tada možemo izračunati koja bi bila vjerojatna povijest svemira u realnom vremenu.

Uvjet bezgraničnosti

U klasičnoj teoriji gravitacije, koja se temelji na realnom prostor-vremenu, svemir se može ponašati samo na dva moguća načina. Ili postoji oduvijek, ili je imao početak u singularnosti nekog određenog vremena u prošlosti. U stvari, teoremi o singularnosti pokazuju da je upravo ta druga mogućnost točna. U kvantnoj teoriji gravitacije, s druge strane, pojavljuje se i treća mogućnost. Kada koristimo euklidsko prostor-vrijeme, u kojemu je smjer vremena na istoj ravni kao i smjerovi u prostoru, moguće je da vrijeme-prostor bude konačno u protežnosti, a da pritom ipak nema singularnosti koje bi formirale rub ili granicu. Prostor-vrijeme bilo bi tu poput površine Zemlje, samo s dvije dimenzije više. Površina Zemlje je konačna u protežnosti, ali nema rub ili granicu. Ako odjedrite u sumrak, nećete pasti preko ruba niti naletjeti na singularnost. Znam to, jer sam prošao čitav svijet.

Ako je euklidsko prostor-vrijeme tamo negdje unatrag u beskrajnom imaginarnom vremenu ili bilo gdje drugdje započelo u singularnosti, imat ćemo isti problem kao i u klasičnoj teoriji prilikom određivanja početnog stanja svemira. Sam Bog zna kako je svemir započeo, ali mi ne možemo dati ni jedan poseban razlog za mišljenje da je radije počeo na jedan način nego na drugi. S druge strane, kvantna teorija gravitacije otvorila je novu mogućnost. Prema njoj, neće biti granice prostor-vremena. Tako, neće biti ni potrebe da se odredi ponašanje na toj granici. Neće postojati singularnosti u kojima se zakoni fizike slamaju, niti će biti ruba prostor-vremena na kojem bismo se trebali obratiti Bogu ili nekom novom zakonu da odredi granične uvjete prostor-vremena. Netko bi mogao reći: »Granični uvjet svemira je taj da nema granice.« Svemir bi bio potpuno samodostatan i na njega ne bi utjecalo ništa izvan njega samoga. Ne bi bio ni stvoren, niti uništen. Jednostavno bi bio.

Upravo na onoj konferenciji u Vatikanu sam prvi put iznio prijedlog da možda vrijeme i prostor zajedno tvore površinu koja je konačna po veličini, ali nema nikakav rub ili granicu. Moj rad bio je, međutim, prilično matematički, te njegove implikacije o Božjoj ulozi u stvaranju svemira nisu bile primijećene u to vrijeme – što mi je baš odgovaralo. U vrijeme održavanja Vatikanske konferencije, nisam znao kako bih primijenio zamisao o bezgraničnosti na predviđanja o svemiru. Međutim, sljedeće ljeto proveo sam na Sveučilištu Kalifornije, Santa Barbara. Tamo je moj prijatelj i kolega Jim Hartle sa mnom izračunao koje uvjete bi morao zadovoljiti svemir ako prostor-vrijeme nema granicu.

Moram naglasiti kako je u to vrijeme ideja da vrijeme i prostor mogu biti konačni, a bez granice, bila samo prijedlog. Nije se mogla izvesti ni iz kojeg drugog principa. Poput bilo koje znanstvene teorije, ona se mogla iznijeti već i zbog estetskih ili metafizičkih razloga, ali o njezinoj

valjanosti odlučuje to postavlja li ona predviđanja koja su u skladu s opažanjima. To je, međutim, teško odrediti u slučaju kvantne gravitacije, i to iz dva razloga. Prvo, mi još nismo sigurni koja točno teorija uspješno kombinira opću relativnost i kvantnu mehaniku, iako znamo prilično mnogo o tome kakav bi oblik takva teorija morala imati. Drugo, bilo koji model koji bi detaljno opisivao svemir bio bi za nas matematički suviše kompliciran da bismo iz njega mogli izračunati točna predviđanja. Stoga moramo raditi aproksimacije – pa čak i tada problem izvlačenja predviđanja ostaje veoma težak.

Uz uvjet bezgraničnosti, otkrivamo kako je zanemariva šansa da se pokaže kako je svemir slijedio većinu mogućih povijesti. Ali postoji određena klasa povijesti koje su mnogo vjerojatnije od drugih. Te povijesti mogu se zamisliti kao da su nalik na površinu Zemlje, pri čemu udaljenost od Sjevernog pola predstavlja imaginarno vrijeme; veličina geografske širine predstavljala bi prostornu veličinu svemira. Svemir počinje u jednoj točki na Sjevernom polu. Kako se krećemo prema jugu, geografska širina postaje veća, što korespondira svemiru koji se širi u imaginarnom vremenu. Svemir će dosegnuti maksimalnu veličinu na ekvatoru i ponovno se skupiti u jednu jedinu točku na Južnom polu. Iako će svemir imati veličinu nula i na Sjevernom i na Južnom polu, te točke neće biti singularnost kao što ni Južni i Sjeverni pol na Zemlji nisu singularni. Zakoni znanosti održat će se na početku svemira, baš kao što to jesu i na Sjevernom i Južnom polu na Zemlji.

Povijest svemira u realnom vremenu, međutim, izgledat će mnogo drugačije. Čini se da će početi u nekoj minimalnoj veličini, jednako kao što povijest u imaginarnom vremenu počinje na maksimalnoj veličini. Svemir će se tada širiti u realnom vremenu kao što je opisano u inflacijskom modelu. Ipak, ne moramo pretpostaviti da

je svemir stvoren baš u pravoj vrsti stanja. Svemir će se proširiti do veoma velike veličine, ali na kraju će ponovno kolabirati u nešto nalik na singularnost u realnom vremenu. Tako smo, na neki način, svi mi ipak osuđeni na propast, čak i ako se držimo podalje od crnih rupa. Samo ako zamislimo sliku svemira u pojmovima imaginarnog vremena, možemo izbjeći singularnosti.

Teoremi o singularnosti iz klasične opće relativnosti pokazali su kako svemir mora imati početak, a taj početak mora biti opisan u pojmovima kvantne teorije. To nas pak dovodi do ideje da svemir može biti konačan u imaginarnom vremenu, ali bez granica ili singularnosti. No, kad se vratimo natrag u realno vrijeme u kojemu i sami živimo, u njemu će se, prema svemu sudeći, ponovno javiti singularnosti. Jadnog astronauta koji je pao u crnu rupu i dalje čeka mizeran kraj. On se ne bi susreo sa singularnošću jedino u slučaju da uspije živjeti u imaginarnom vremenu.

To bi nas moglo navesti na pomisao da je takozvano imaginarno vrijeme zapravo fundamentalno vrijeme, a da je ono što zovemo realnim vremenom nešto što smo sami stvorili u svojim umovima. U realnom vremenu, svemir ima početak i kraj u singularnostima koje tvore granicu prostor-vremena i u kojima se zakoni znanosti slamaju. Ali u imaginarnom vremenu ne postoje ni singularnosti niti granice. Dakle, možda je doista to što zovemo imaginarnim vremenom temeljnije, a ono što zovemo realnim vremenom je samo ideja koju smo smislili kako bismo si pomogli da opišemo što mislimo o tome kakav je svemir. Ali, u skladu s pristupom koji sam opisao u prvom predavanju, znanstvena teorija je samo matematički model koji stvaramo kako bismo opisali svoja zapažanja. Ona postoji samo u našim umovima. Tako uopće nema smisla pitati što je stvarno, »realno« ili »imaginarno« vrijeme. Radi se samo o tome koje od ta dva vremena predstavlja bolji opis.

Prijedlog o bezgraničnosti, čini se, predviđa da bi se u realnom vremenu svemir trebao ponašati kao u inflacijskom modelu. Posebno zanimljiv problem predstavlja veličina malih otklona od jednolike gustoće u ranom svemiru. Misli se kako su ti otkloni doveli do formacije ponajprije galaksija, potom i zvijezda, i konačno do bića poput nas. Načelo neodređenosti implicira da rani svemir nije mogao biti u potpunosti jednolik. Umjesto toga, morale su postojati neke nesigurnosti ili fluktuacije u položajima i ubrzanjima čestica. Koristeći uvjet bezgraničnosti, otkrivamo kako je svemir morao započeti s upravo minimumom moguće nejednolikosti koju dopušta načelo neodređenosti.

Nakon toga je svemir morao proći razdoblje brzog širenja, kao u inflacijskom modelu. Tijekom tog razdoblja, početne nejednakosti bile bi uvećane sve dok ne bi postale dovoljno velike da bi se njima moglo objasniti podrijetlo galaksija. Tako, sve složene strukture koje mi vidimo u svemiru mogu biti objašnjene uvjetom bezgraničnosti svemira i načelom neodređenosti kvantne mehanike.

Ideja da prostor i vrijeme mogu oblikovati zatvorenu površinu bez granice također ima duboke implikacije na ulogu Boga u pitanjima vezanim za svemir. Zbog uspjeha znanstvenih teorija u objašnjavanju događaja, većina ljudi počela je misliti kako Bog dopušta svemiru da se razvije u skladu s određenim zakonima. Čini se da On u svemiru ne djeluje na način koji bi kršio te zakone. Međutim, zakoni nam ne govore kako je svemir mogao izgledati na svom početku. I dalje ostaje na Bogu da navije satni mehanizam svemira te odredi kako sve počinje. Sve dok svemir ima početak u singularnosti, možemo pretpostavljati da ga je stvorio neki izvanjski činitelj. Ali ako je svemir zaista u potpunosti samodostatan, bez granice ili ruba, bio bi nestvoren i neuništiv. Jednostavno bi bio. Što je onda sa Stvoriteljem?

Šesto predavanje
Smjer vremena

U svojoj knjizi *Prolaz između* (*The Go Between*) L. P. Hartley je napisao: »Prošlost je strana zemlja. Tamo sve rade drukčije – ali zašto je prošlost toliko drugačija od budućnosti? Zašto se sjećamo prošlosti, a ne i budućnosti?« Drugim riječima, zašto vrijeme ide naprijed? Je li to povezano s činjenicom da se svemir širi?

C, P, T

Zakoni fizike ne prave razliku između prošlosti i budućnosti. Preciznije rečeno, fizikalni zakoni ne mijenjaju se podvrgnuti kombinaciji operacija poznatih kao C, P i T. (C znači promjenu čestica u antičestice. P znači da je zrcalna slika takva da su desna i lijeva strana zamijenjene. A T znači izokretanje smjera kretanja svih čestica – u stvari, vraćanje pokreta unatrag.) Fizikalni zakoni koji upravljaju ponašanjem materije u normalnim situacijama ostaju nepromijenjeni pod samim operacijama C i P. Drugim riječima, život bi bio potpuno isti i za stanovnike drugog planeta koji su naša zrcalna slika i koji su načinjeni od antimaterije. Ako sretnete nekoga s drugog planeta i on vam pruži svoju lijevu ruku, nemojte se rukovati. Mogao bi biti načinjen od antimaterije. Oboje biste nestali u strahovitom bljesku svjetla. Ako se zakoni fizike ne mijenjaju pod kombinacijom operacija C i P, kao ni pod kombinacijom operacija C, P i T, ne bi se smjeli mijenjati niti pod

samom operacijom T. Ipak, u svakodnevnom životu postoji velika razlika između smjerova prema naprijed i prema unatrag. Zamislite šalicu vode koja pada sa stola i lomi se u komadiće na podu. Ako to snimite kamerom, lako ćete vidjeti kreće li se film naprijed ili unatrag. Kad ga pokrenete unatrag, vidjet ćete kako se slomljeni komadići naglo okupljaju kod poda i skaču natrag kako bi stvorili čitavu i punu šalicu na stolu. Možete biti sigurni da se film vrtio unatrag jer takvu vrstu ponašanja nikad ne uočavamo u običnom životu. U suprotnom bi svi proizvođači lomljivih dobara ostali bez posla.

Strijele vremena

Činjenicu da ne vidimo kako slomljene šalice skaču natrag na stol obično nam objašnjavaju time što je to zabranjeno drugim zakonom termodinamike. On kaže da se nered ili entropija s vremenom uvijek povećavaju. Drugim riječima, to je Murphyjev zakon – stvari se uvijek pogoršavaju. Netaknuta šalica na stolu predstavlja stanje visokog reda, ali slomljena šalica na podu predstavlja stanje nereda. Možemo se dakle kretati od čitave šalice na stolu u prošlosti do slomljene šalice na podu u budućnosti, ali ne i obrnuto.

Povećavanje nereda ili entropije s vremenom jedan je primjer nečega što se naziva *strijelom vremena*, a to je nešto što daje vremenu smjer i po čemu se prošlost razlikuje od budućnosti. Postoje barem tri različite strijele vremena. Prvo, tu je termodinamička strijela vremena – smjer vremena u kojem se nered ili entropija povećava. Drugo, tu je psihološka strijela vremena. Riječ je o smjeru u kojem osjećamo protok vremena – smjer vremena u kojem se sjećamo prošlosti, ali ne budućnosti. Treće, tu je i kozmološka strijela vremena. To je pak smjer u kojem se svemir širi, umjesto da se skuplja.

Pokušat ću dokazati da je psihološka strijela određena termodinamičkom strijelom i da te dvije strijele uvijek idu u istom smjeru. Ako uzmemo da za svemir vrijedi pretpostavka bezgraničnosti, one su povezane s kozmološkom strijelom vremena, iako ne moraju biti usmjerene u istom smjeru. Međutim, ja ću dokazati da se jedino u slučaju kad se one poklapaju s kozmološkom strijelom mogu pojaviti inteligentna bića koja mogu postaviti pitanje: zašto se nered povećava u istom smjeru vremena u kojem se i svemir širi?

Termodinamička strijela

Najprije ću govoriti o termodinamičkoj strijeli vremena. Drugi zakon termodinamike temelji se na činjenici da postoji mnogo više neuređenih stanja nego uređenih. Primjerice, prisjetimo se komadića slagalice u kutiji. Postoji jedan, i samo jedan, poredak u kojem komadići tvore cjelovitu sliku. S druge strane, postoji veoma veliki broj poredaka u kojima komadići slagalice ne tvore sliku.

Pretpostavimo da sustavi započinju u jednom od malih brojeva uređenih stanja. Kako vrijeme prolazi, sustav će se razvijati u skladu sa zakonima fizike i njegovo stanje će se promijeniti. Velika je vjerojatnost da će u kasnijem vremenu sustav biti u manje uređenom stanju, jednostavno stoga što postoji toliko mnogo više neuređenih stanja. Prema tome, nered će imati tendenciju povećavanja s vremenom ako se sustav pokorava inicijalnom uvjetu višeg reda.

Pretpostavimo da komadići slagalice počinju u uređenom poretku u kojem tvore sliku. Ako protresete kutiju, komadići će se drugačije rasporediti. To će vjerojatno biti neuređeni poredak u kojem komadići ne tvore pravu sliku, jednostavno zato što postoji toliko više neuređenih poredaka. Neke grupe komadića mogu i dalje tvoriti dijelove

slike, ali što više tresete kutiju, tim je veća vjerojatnost da će se raspasti i te grupe. Komadići će zauzeti potpuno zbrkano stanje u kojem ne tvore nikakvu sliku. Tako, nered komadića će se s vremenom vjerojatno povećavati ako se pokoravaju inicijalnom uvjetu da počinju u stanju visokog reda.

Pretpostavimo, međutim, da je Bog odlučio kako će svemir završiti u neka kasnija vremena u stanju visokog reda, a pritom nije važno u kojem stanju je započeo. Tada bi u rana vremena svemir vjerojatno bio u neuređenom stanju, a nered bi se s vremenom smanjivao. Slomljene šalice bi vam se onda ponovno slagale u cjelinu i skakale natrag na stol. No, i svako ljudsko biće koje promatra šalice živjelo bi u svemiru u kojem se nered s vremenom smanjuje. Ja tvrdim da bi se psihološka strijela vremena za ta bića kretala unatrag. To znači da bi se otuda oni sjećali onog što je bilo poslije, a ne bi se sjećali onoga što je bilo prije.

Psihološka strijela

Prilično je teško pričati o ljudskom sjećanju jer ne znamo u potpunosti kako mozak funkcionira. Ali zato znamo sve o tome kako funkcionira računalna memorija. Zbog toga ću govoriti o psihološkoj strijeli vremena za računala. Mislim da je opravdano pretpostaviti da je strijela ista i za računala i za ljude. Da nije tako, netko bi mogao napraviti pravi pomor na burzi uz pomoć računala koje bi pamtilo sutrašnje cijene. Računalna memorija u osnovi je određeni uređaj koji može biti u jednom od dva stanja. Jedan primjer neka bude supervodljiva petlja žice. Ako u petlji postoji protok električne energije, on će se nastaviti jer ne postoji otpor. S druge strane, ako nema struje, petlja će nastaviti biti bez struje. Možemo označiti dva stanja memorije s »jedan« i »nula«. Prije nego što je nešto zabilježeno u memoriji,

memorija je u neuređenom stanju s jednakom vjerojatnosti za jedan i za nula. Nakon što se dogodi interakcija memorije i sustava, kojom se nešto pamti, stanje će definitivno biti ili ovakvo ili onakvo, već prema stanju sustava. Dakle, memorija se kreće od neuređenog stanja ka uređenom. Međutim, kako bismo bili sigurni da je memorija u pravom stanju, moramo upotrijebiti određenu količinu energije. Ta energija se osipa kao toplina i povećava količinu nereda u svemiru. Moguće je pokazati da je to povećanje nereda veće od povećanja reda u memoriji. Tako, kada računalo snimi nešto u svoju memoriju, ukupni iznos nereda u svemiru se povećava.

Smjer vremena u kojem se računalo sjeća prošlosti jednak je kao i smjer u kojem se povećava nered. To znači da je naš subjektivni osjećaj smjera vremena, psihološka strijela vremena, određen termodinamičkom strijelom vremena. To čini drugi zakon termodinamike gotovo trivijalnim. Nered se s vremenom povećava jer mi mjerimo vrijeme u smjeru u kojem se nered povećava. Ako se u to okladite, teško da ćete izgubiti.

Granični uvjeti svemira

Ali zašto bi svemir bio u stanju visokog reda na jednom kraju vremena, onom kojega zovemo prošlošću? Zašto nije u stanju kompletnog nereda u svim vremenima? Naposljetku, to bi se moglo činiti i vjerojatnijim. I zašto je smjer vremena u kojem se nered povećava isti kao i smjer u kojem se svemir širi? Jedan od mogućih odgovora glasi da je Bog jednostavno izabrao da svemir bude u ravnomjernom i uređenom stanju u početku faze širenja. Ne trebamo se truditi shvatiti zašto, ni propitivati Njegove razloge jer početak svemira je bio djelo Božje. Ali i za čitavu povijest svemira može se reći da je djelo Božje.

Čini se da se svemir razvija u skladu s točno utvrđenim zakonima. Tim zakonima možda upravlja Bog, a možda i ne, no čini se da ih mi možemo otkriti i razumjeti. Je li, dakle, nerazumno nadati se da bi isti ili slični zakoni vrijedili na početku svemira? U klasičnoj teoriji opće relativnosti, početak svemira morao je biti singularnost ili beskonačna gustoća u zakrivljenosti prostor-vremena. Pod tim uvjetima, svi poznati zakoni fizike ne bi vrijedili. Prema tome, ne možemo ih koristiti kako bismo predvidjeli kako bi svemir mogao početi.

Svemir je mogao započeti u veoma ravnomjernom i uređenom stanju. To bi dovelo do točno definiranih termodinamičkih i kozmoloških strijela vremena, kao što i uočavamo. Ali mogao je isto tako započeti u veoma nagrudanom i neuređenom stanju. U tom slučaju, svemir bi se već nalazio u stanju potpunog nereda, tako da se nered ne bi mogao povećavati s vremenom. Ili bi ostao konstantan, a u tom slučaju ne bi bilo točno definirane termodinamičke strijele vremena, ili bi opadao, a u tom slučaju bi termodinamička strijela vremena bila usmjerena u smjeru suprotnom od kozmološke strijele. Nijedna od tih mogućnosti ne bi bila u skladu s onim što vidimo.

Kao što sam spomenuo, klasična teorija opće relativnosti predviđa da je svemir morao početi u singularnosti u kojoj je zakrivljenost prostor-vremena beskonačna. U stvari, to znači da klasična opća relativnost predviđa svoju vlastitu propast. Kad zakrivljenost prostor-vremena postane velika, kvantni gravitacijski učinci postaju važni i klasična teorija prestaje biti dobar opis svemira. Mora se primijeniti kvantna teorija gravitacije kako bi se razumio početak svemira.

U kvantnoj teoriji gravitacije razmatraju se sve moguće povijesti svemira. Uz svaku pojedinu povijest pridružuje se par brojeva. Jedan predstavlja veličinu vala, a drugi lice

vala, dakle je li val vrh ili udubljenje. Vjerojatnost da je svemir imao određeno svojstvo dobiva se izračunavanjem valova za sve povijesti s tim svojstvom. Povijesti bi bile zakrivljeni prostori koji predstavljaju razvoj svemira u vremenu. I dalje bismo morali reći kako bi se ponašale moguće povijesti na granici prostor-vremena u prošlosti. Mi ne znamo i ne možemo znati granične uvjete svemira u prošlosti. Međutim, možemo izbjeći tu poteškoću ako je granični uvjet svemira taj da on nema granicu. Drugim riječima, sve moguće povijesti konačne su u protežnosti, ali nemaju granice, rubove ili singularnosti. One su poput površine Zemlje, ali s dvije dodatne dimenzije. U tome slučaju, početak vremena bio bi pravilna glatka točka prostor-vremena. To znači da bi svemir započeo svoje širenje u vrlo ujednačenom i uređenom stanju. Ne bi mogao biti potpuno jednolik jer bi to kršilo načelo neodređenosti kvantne teorije. Morale bi postojati male fluktuacije u gustoći i ubrzanju čestica. Uvjet bezgraničnosti, međutim, implicirao bi da su te fluktuacije najmanje moguće, u skladu s načelom neodređenosti.

Svemir bi morao započeti s razdobljem eksponencijalnog ili »inflacijskog« širenja. U tom razdoblju bi u veoma velikoj mjeri povećao svoju veličinu. Tijekom tog širenja, fluktuacije u gustoći isprva bi ostale male, no kasnije bi počele rasti. Područja u kojima je gustoća bila malo viša od prosjeka usporile bi svoje širenje zbog gravitacijske privlačnosti dodatne mase. Na kraju bi se takva područja prestala širiti, te bi kolabirala stvarajući galaksije, zvijezde i bića poput nas.

Svemir je mogao početi u glatkom i uređenom stanju i s vremenom postati grudast i neuređen. To bi objasnilo postojanje termodinamičke strijele vremena. Takav svemir bi počeo u stanju visokog reda i s vremenom postajao sve neuređeniji. Kako sam ranije pokazao, psihološka strijela

vremena usmjerena je u istom smjeru kao i termodinamička strijela. Zbog toga naš subjektivni doživljaj vremena podržava sliku svemira koji se širi, prije nego suprotnu, prema kojoj bi se skupljao.

Okreće li se strijela vremena unatrag?

Ali što bi se dogodilo ako i kad bi se svemir prestao širiti i počeo ponovno skupljati? Bi li se termodinamička strijela okrenula unatrag, a nered počeo opadati? To bi moglo dovesti do svih zamislivih mogućnosti iz filmova znanstvene fantastike, naravno za one ljude koji bi preživjeli čitav taj tijek iz faze širenja u fazu skupljanja. Bi li oni vidjeli kako slomljene šalice ponovno postaju cijele i s poda skaču na stol? Bi li bili u stanju zapamtiti sutrašnje cijene i obogatiti se na burzi?

Briga o tome što će se dogoditi kad svemir ponovno kolabira može se učiniti pomalo nepotrebnom, budući da se on neće početi skupljati barem još sljedećih deset tisuća milijuna godina. Ali postoji brži način da otkrijemo što bi se moglo dogoditi: skokom u crnu rupu. Kolaps zvijezde koja formira crnu rupu prilično je nalik na posljednje faze kolapsa čitavog svemira. Tako, ako nered treba opadati u fazi skupljanja svemira, mogli bismo očekivati da će opadati i unutar crne rupe. Pretpostavimo da bi se astronaut koji padne u crnu rupu mogao obogatiti na ruletu pamteći gdje je kuglica stala prije nego što uloži novac. Na nesreću, ipak, on neće imati mnogo vremena za igru prije nego što ga vrlo jaka gravitacijska polja pretvore u špagete. Niti će biti u stanju dati nam do znanja kako se okreće termodinamička strijela, pa čak ni unovčiti svoj dobitak, jer će biti zarobljen s onu stranu horizonta događaja crne rupe.

Prije sam vjerovao da bi se nered trebao smanjivati kad svemir rekolabira. To je zato što sam mislio da bi se svemir

trebao vratiti glatkom i uređenom stanju kad ponovno postane malen. To bi bilo značilo da bi faza kontrakcije bila poput obrnutog vremena ekspandirajuće faze. Ljudi u kontrahirajućoj fazi živjeli bi svoje živote unatrag. Umrli bi prije nego što se rode i postajali bi mlađi dok se svemir skuplja. Ta ideja je privlačna jer podrazumijeva krasnu simetriju između ekspandirajuće i kontrahirajuće faze. Međutim, ne možemo je usvojiti samu po sebi, neovisno o drugim idejama o svemiru. Pitanje je: implicira li tu ideju uvjet bezgraničnosti ili je ona neodrživa pod tim uvjetom?

Kao što sam spomenuo, prvo sam mislio da uvjet bezgraničnosti doista implicira da bi nered opadao u kontrahirajućoj fazi. To se temeljilo na radu o jednostavnom modelu svemira u kojem kolabirajuća faza izgleda poput obrnutog vremena ekspandirajuće faze. Međutim, moj kolega, Don Page, naglasio je kako uvjet bezgraničnosti ne zahtijeva da kontrahirajuća faza nužno bude obrnuto vrijeme ekspandirajuće faze. Nadalje, jedan od mojih studenata, Raymond Laflamme, otkrio je kako je u samo malo kompliciranijem modelu kolaps svemira posve drugačiji od širenja. Shvatio sam da sam pogriješio. U stvari, uvjet bezgraničnosti implicira da će se nered i dalje povećavati tijekom kontrakcije. Termodinamička i psihološka strijela vremena neće se okrenuti unatrag kad se svemir počne ponovno skupljati, niti unutar crne rupe.

Što radiš kad shvatiš da si tako pogriješio? Neki ljudi, poput Eddingtona, nikada ne priznaju da su u krivu. Nastavljaju pronalaziti nove, često međusobno proturječne argumente, kojima će pokazati da su ipak u pravu. Drugi pak tvrde da u prvom redu nikada nisu stvarno podržavali to netočno gledište, a ako i jesu, činili su to samo kako bi pokazali da je neodrživo. Mogao bih vam navesti golem broj primjera takve vrste, ali neću, jer bi me to učinilo veoma nepopularnim. Meni se činilo mnogo bolje i manje zbunjujućim jednostavno javno priznati da sam

bio u krivu. Dobar primjer za to je Einstein koji je rekao da je kozmološka konstanta, koju je uveo dok je pokušavao stvoriti statični model svemira, najveća pogreška u njegovu životu.

Sedmo predavanje
Teorija svega

07.

Bilo bi veoma teško ujedinjujuću teoriju svega konstruirati u jednom jedinom pokušaju. Tako, umjesto toga, moramo napredovati otkrivajući parcijalne teorije. One opisuju ograničeni spektar događaja i zanemaruju druge učinke, ili ih aproksimiraju određenim brojevima. U kemiji, primjerice, možemo izračunati interakciju atoma i bez poznavanja unutarnje strukture jezgre atoma. U konačnici, međutim, nadamo se da ćemo pronaći cjelovitu, konzistentnu, ujedinjujuću teoriju koja će uključiti sve te parcijalne teorije kao aproksimacije. Potraga za takvom teorijom poznata je kao »objedinjavanje fizike«.

Einstein je veći dio svojih kasnijih godina proveo neuspješno tražeći takvu ujedinjujuću teoriju, ali vrijeme još nije bilo dozrelo: znalo se veoma malo o nuklearnim silama. K tome, Einstein je odbijao vjerovati u stvarnost kvantne mehanike, unatoč važnoj ulozi koju je imao u njezinom razvitku. Ipak se čini da načelo neodređenosti jest temeljna pojava svemira u kojem živimo. Uspješna ujedinjujuća teorija mora stoga nužno uključiti i to načelo. Izgledi da ćemo naći takvu teoriju sada se čine mnogo bolji, jer znamo mnogo više o svemiru. No, moramo se čuvati pretjeranog samopouzdanja. I prije smo imali pogrešna uvjerenja. Na početku 20. stoljeća, primjerice, mislilo se kako se sve može objasniti svojstvima protežne tvari, kao što su elasticitet i toplinska vodljivost. Otkriće

atomske strukture i načela neodređenosti označili su kraj takvog mišljenja. A opet, kasnije, 1928. godine, Max Born je rekao skupini posjetitelja Sveučilišta Göttingen: »Fizika kakvu poznajemo za šest će mjeseci biti prošlost.« Njegovo uvjerenje temeljilo se na nedavnom Diracovom otkriću jednadžbe o ponašanju elektrona. Smatralo se kako će se slična jednadžba odnositi i na proton, koji je u to vrijeme bio jedina druga čestica za koju se znalo, te da će to biti kraj teorijske fizike. Međutim, otkriće neutrona i nuklearnih sila i tu je zabludu privelo kraju.

Unatoč svemu što sam rekao, i dalje vjerujem kako postoje temelji za oprezan optimizam u pogledu toga da bismo sada mogli biti blizu dovršetka potrage za konačnim zakonima prirode. U ovom trenutku imamo velik broj parcijalnih teorija. Imamo opću relativnost, parcijalnu teoriju gravitacije te parcijalne teorije koje objašnjavaju ponašanje slabih, jakih i elektromagnetskih sila. Posljednje tri mogle bi se spojiti u takozvane velike ujedinjujuće teorije. One nisu baš zadovoljavajuće jer ne uključuju gravitaciju. Glavna poteškoća u pronalaženju teorije koja objedinjuje gravitacijsku s drugim silama, nalazi se u tome što je opća relativnost klasična teorija. To znači, ona ne uključuje načelo neodređenosti kvantne mehanike. S druge strane, druge parcijalne teorije u esencijalnom smislu ovise o kvantnoj mehanici. Nužni prvi korak, stoga, jest spojiti opću relativnost s načelom neodređenosti. Kao što smo vidjeli, to može proizvesti neke izuzetne posljedice, kao što je ta da crne rupe nisu crne, i da je svemir u potpunosti samodostatan i bez granice. Problem je u tome što načelo neodređenosti znači da je čak i prazni prostor ispunjen parovima virtualnih čestica i antičestica. Ti parovi trebali bi imati neograničenu količinu energije. To znači da bi njihova gravitacijska privlačnost zakrivila svemir do beskonačno male veličine.

Na prilično sličan način, naizgled apsurdne beskonačnosti javljaju se u drugim kvantnim teorijama. Međutim, u tim drugim teorijama, beskonačnosti se mogu poništiti procesima nazvanim renormalizacija. To podrazumijeva prilagođavanje masa čestica i snaga sila u teoriji putem beskonačnih iznosa. Iako je ta tehnika matematički prilično sumnjiva, čini se da djeluje u praksi. Korištena je kako bi se napravila predviđanja koja se u izuzetno visokom stupnju točnosti poklapaju s opažanjima. Renormalizacija, međutim, ima ozbiljne manjkavosti ako je promatramo s gledišta potrage za ujedinjujućom teorijom. Kad oduzmete beskonačnost od beskonačnosti, rezultat može biti kakav god hoćete. To znači da se stvarne vrijednosti masa i snaga sila ne mogu predvidjeti prema postojećim teorijama. Umjesto toga, moraju se odabrati tako da se poklapaju s promatranjima. U slučaju opće relativnosti, postoje samo dvije kvantitete koje se mogu prilagoditi: snaga gravitacije i vrijednost kozmološke konstante. Ali njihova prilagodba nije dovoljna da bi se uklonile sve beskonačnosti. Zbog toga se čini kako imamo teoriju koja naizgled predviđa da su određene kvantitete, kao što je zakrivljenost prostor-vremena, doista beskonačne, a ipak se te kvantitete mogu promatrati i mjeriti kao savršeno konačne. U nastojanju da se prebrodi taj problem, 1976. godine predložena je teorija nazvana »supergravitacijom«. Ta teorija je zapravo bila samo opća relativnost kojoj je dodano nešto čestica.

U općoj relativnosti, gravitacijska sila može se zamisliti kao da je nošena česticom koja ima vrtnju 2 i zove se graviton. Ideja se sastojala u dodavanju određenih drugih novih čestica s vrtnjama 3/2, 1, 1/2 i 0. Na neki način, sve te čestice onda bi se mogle smatrati različitim aspektima iste »superčestice«. Parovi virtualnih čestica/antičestica s vrtnjama 1/2 i 3/2 imali bi negativnu energiju. Ona bi naginjala k tome da poništi pozitivnu energiju virtualnih

parova s vrtnjom 0, 1 i 2. Na taj način, mnoge od mogućih beskonačnosti bi se poništile, no sumnjalo se da bi neke beskonačnosti mogle ostati održane. Međutim, izračuni potrebni da se dokuči je li neka beskonačnost ostala neponištena, bili su toliko dugački i teški da ih se nitko nije bio spreman uhvatiti. Čak i uz računalo, smatralo se da bi za te izračune bile potrebne bar četiri godine. Šanse su bile vrlo velike da bi se pri računanju napravila bar jedna pogreška, a vjerojatno i više njih. Dakle, netko bi mogao reći da je dobio točan rezultat samo u slučaju da netko drugi ponovi izračune i dobije isti rezultat, a to baš i nije izgledalo vjerojatnim. Zbog tog problema došlo je do promjene općeg stava, i to u korist takozvanih teorija struna. U tim teorijama temeljni objekt nisu čestice koje zauzimaju jedno mjesto u prostoru. Prije, to su stvari koje imaju duljinu ali ne i bilo kakvu drugu dimenziju, nešto kao beskrajno tanka petlja strune. Čestica zauzima uvijek jednu točku prostora u svakom pojedinom trenutku. Tako, njezina se povijest može prikazati crtom u prostor-vremenu nazvanom »svijet crte«. Struna, s druge strane, zauzima liniju u prostoru u svakom trenutku vremena. Tako je njezina povijest u prostor-vremenu dvodimenzionalna površina nazvana »svijet plahte«. Svaka točka na takvoj plahti može biti opisana dvama brojevima, pri čemu jedan određuje vrijeme, a drugi položaj točke na struni. Svijet plahte strune je cilindar ili cijev. Presjek cijevi je krug, koji predstavlja položaj strune u određenom trenutku.

Dva komadića strune mogu se združiti kako bi oblikovali jednu strunu. To je poput dviju nogavica koje se spajaju u par hlača. Na sličan način, jedan komadić strune može se podijeliti u dvije strune. U teorijama struna, ono što se prije smatralo česticama sada se prikazuje u obliku valova koji putuju niz strunu, poput valova na traci za pranje. Emisija ili apsorpcija jedne čestice drugom odgovara dijeljenju ili

združivanju struna. Na primjer, gravitacijska sila Sunca na Zemlji odgovara cilindru ili cijevi oblika slova H. Teorija struna je, na neki način, prilično nalik na vodoinstalacije. Valovi na dvjema vertikalnim stranama tog H-a odgovaraju česticama u Suncu i Zemlji, a valovi na horizontalnoj prečki odgovaraju gravitacijskoj sili koja putuje između njih.

Teorija struna ima zanimljivu povijest. Izvorno je izumljena kasnih 60-ih godina 20. stoljeća, tijekom pokušaja pronalaženja teorije koja bi opisala jake sile. Ideja se sastojala u tome da se čestice poput protona i neutrona mogu smatrati valovima na struni. Jake sile među česticama odgovarale bi komadićima strune koji su se provukli kroz druge komadiće strune, kao u paukovoj mreži. Kako bi ta teorija dala uočenu vrijednost jakih sila među česticama, strune bi morale biti poput gumenih traka koje mogu izdržati pritisak od oko deset tona.

Godine 1974. Joël Scherk i John Schwarz objavili su rad u kojem su pokazali da teorija struna može opisati gravitacijsku silu, ali samo ako je napetost u struni mnogo, mnogo veća – oko 1039 tona. Predviđanja teorije struna bila bi upravo jednaka onima opće relativnosti na normalnim skalama duljina, ali bi se razlikovala na vrlo malim udaljenostima – manjima od 10-33 centimetra. Njihov rad nije privukao veću pažnju, ipak, jer je upravo nekako u to vrijeme većina ljudi napustila izvornu teoriju struna o jakim silama. Scherk je umro u tragičnim okolnostima. Patio je od dijabetesa i pao u komu dok nije bilo nikog u blizini tko bi mu dao injekciju inzulina. Tako je Schwarz ostao sam kao gotovo jedini zagovornik teorije struna, ali sad s mnogo višim predloženim vrijednostima napetosti strune.

Čini se kako postoje dva razloga za ponovno oživljavanje zanimanja za strune tijekom 1984. godine. Jedan je taj što ljudi zapravo i nisu napredovali prema otkriću pokazatelja da je supergravitacija konačna ili da bi mogla objasniti vrste

čestica koje uočavamo. Drugi je razlog bio objava rada Johna Schwarza i Mikea Greena, kojim je pokazano da bi teorija struna mogla biti u stanju objasniti postojanje čestica koje imaju ugrađenu ljevorukost, kao što imaju neke čestice koje možemo promatrati. Bez obzira na razloge, velik broj ljudi uskoro se počeo baviti teorijom struna. Razvijena je nova verzija, takozvana heterotička struna. Činilo se kako ona može objasniti vrste čestica koje uočavamo.

Teorije struna također vode do beskonačnosti, ali na takav način da se sve one poništavaju u verzijama kakvu nudi heterotička struna. Te teorije, međutim, imaju veći problem. Čine se konzistentnima samo pod uvjetom da prostor-vrijeme ima ili deset ili dvadeset i šest dimenzija, umjesto uobičajene četiri. Naravno, dodatne dimenzije prostor-vremena uobičajene su u znanstvenoj fantastici; dapače, gotovo su i nužne. Bez njih bi činjenica da relativnost implicira kako ne možemo putovati brže od svjetla značila da bi nam trebalo daleko previše vremena za putovanje preko vlastite galaksije, da i ne spominjemo putovanja u druge galaksije. Znanstveno-fantastična ideja je da možemo putovati prečicom kroz višu dimenziju. Možemo to zamisliti na sljedeći način. Zamislite da prostor u kojem živimo ima samo dvije dimenzije i da je zakrivljen poput torusa ili površine krafne koja u sredini ima rupu. Ako se nalazite na jednoj strani prstena i želite dospjeti na neku točku s druge strane, morat ćete proći oko prstena. Međutim, ako ste u stanju putovati kroz treću dimenziju, možete proći ravno kroz njega.

Zašto ne primjećujemo sve te dodatne dimenzije ako one stvarno postoje? Zašto vidimo samo tri dimenzije prostora i jednu vremena? Sugerira se da su druge dimenzije tako zakrivljene u prostor veoma male veličine, nešto poput milijun milijun milijun milijun milijuntog dijela centimetra. To je tako maleno da to jednostavno ne

primjećujemo. Vidimo samo tri dimenzije prostora i jednu vremena, pri čemu je prostor-vrijeme jednakomjerno ravno. To je poput površine naranče: ako je gledate izbliza, sva je zakrivljena i naborana, ali ako je gledate iz daljega, ne vidite kvržice i ona će vam izgledati glatkom. Isto je tako i s prostor-vremenom. Na vrlo maloj skali, on je desetodimenzionalan i veoma zakrivljen. Ali na većim skalama, ne vidite zakrivljenja niti dodatne dimenzije.

Ako je ta slika točna, ona donosi loše vijesti za one koji žele putovati kroz prostor. Dodatne dimenzije bit će daleko premalene da kroz njih prođe svemirski brod. Međutim, tu se otvara još jedan veći problem. Zašto bi neke, a ne sve dimenzije bile zakrivljene u malu kuglu? Pretpostavka je da su u vrlo ranom svemiru sve dimenzije bile veoma zakrivljene. Zašto bi se izravnale tri dimenzije prostora i jedna dimenzija vremena, dok bi sve ostale dimenzije ostale čvrsto zakovrčane?

Jedan od mogućih odgovora je antropični princip. Dvije prostorne dimenzije ne čine se dovoljnima da dopuste razvitak složenih bića poput nas. Na primjer, dvodimenzionalni ljudi na jednodimenzionalnoj Zemlji morali bi se penjati jedni preko drugih kako bi se mimoišli. Da dvodimenzionalno biće pojede nešto što ne može u potpunosti probaviti, moralo bi izbaciti ostatke istim putem kojim su i uneseni, jer da postoji prolaz kroz njegovo tijelo, taj bi prolaz razdvojio biće na dva odvojena dijela. Naše dvodimenzionalno biće bi se raspalo. Na sličan način, teško je shvatiti kako bi kod dvodimenzionalnog bića moglo biti ikakve cirkulacije krvi. Problema bi također bilo i s više od tri dimenzije. Gravitacijska sila između dva tijela opadala bi brže s udaljenošću nego što je to slučaj s tri dimenzije. To bi značilo da bi orbite planeta, poput Zemlje, oko Sunca bile nestabilne. Najmanji poremećaj kružne orbite, kakav bi uzrokovala već gravitacijska privlačnost drugih planeta,

prouzročila bi da Zemlja u spiralnoj putanji odleti od Sunca, ili se zaleti u njega. Ili bismo se smrzli ili bismo se ispekli. U stvari, isto to ponašanje gravitacije s udaljenosti značilo bi i da bi Sunce bilo nestabilno. Ili bi se raspalo ili bi kolabiralo tvoreći crnu rupu. U svakom slučaju, ne bi bilo korisno kao izvor topline i svjetla za život na Zemlji. Na manjoj skali, električne sile zbog kojih elektron kruži oko jezgre u atomu, ponašale bi se na isti način kao i gravitacijske sile. Tako bi elektroni ili posve pobjegli od atoma, ili bi se spiralnom putanjom sjurili u jezgru. U svakom slučaju, ne bismo imali atome kakve danas poznajemo.

Čini se jasnim da život, bar ovakav kakav poznajemo, može postojati samo u područjima prostor-vremena u kojima tri prostorne i jedna vremenska dimenzija nisu infitezimalno zakrivljene. To bi značilo da se možemo pozvati na antropični princip, uz uvjet da možemo pokazati kako teorija struna dopušta da u najmanju ruku postoje takva područja svemira. A čini se da, svakako, svaka teorija struna dopušta takva područja. Isto tako mogu postojati i druga područja svemira, ili drugi svemiri (što god to moglo značiti) u kojima su sve dimenzije infitezimalno zakrivljene, ili u kojima je više od četiri dimenzije gotovo ravno. Ali u takvim područjima ne bi bilo inteligentnih bića koja bi promotrila različit broj postojećih dimenzija.

Ako i zanemarimo pitanje o tome koliko dimenzija zapravo ima prostor-vrijeme, teorija struna i dalje sadrži nekoliko drugih problema koji se moraju riješiti prije nego što se ona uzmogne proglasiti konačnom ujedinjujućom teorijom fizike. Mi još ne znamo poništavaju li se međusobno sve beskonačnosti, niti kako točno povezati valove strune s određenim vrstama čestica koje možemo uočiti. Ipak, vjerojatno je da će odgovori na ta pitanja biti pronađeni tijekom sljedećih nekoliko godina, te da ćemo

uskoro znati je li teorija struna zaista ta ujedinjujuća teorija fizike koju smo dugo tražili.

Je li uopće moguća ujedinjujuća teorija svega? Ili mi samo trčimo za priviđenjem? Čini se da postoje tri mogućnosti:

- Doista postoji cjelovita ujedinjujuća teorija, koju ćemo jednom otkriti ako smo dovoljno pametni.
- Ne postoji konačna teorija svemira, samo beskrajan niz teorija koje sve točnije i točnije opisuju svemir.
- Ne postoji teorija svemira. Događaji se izvan određene mjere ne mogu predvidjeti, već se pojavljuju nasumično i proizvoljno.

Netko bi se mogao zalagati za treću mogućnost na temelju stava da ako postoji cjelovit niz zakona, to bi ugrozilo Božju slobodu da se predomisli i umiješa u svijet. To je pomalo poput starog paradoksa: je li Bog u stanju napraviti kamen toliko težak da ga On ne može podignuti? Ali i sama ideja da bi se Bog mogao poželjeti predomisliti primjer je zablude u mišljenju, kako je istaknuo sv. Augustin, prema kojoj se Bog zamišlja kao biće koje postoji u vremenu. Vrijeme je samo svojstvo svemira koji je Bog stvorio. Pretpostavka je kako je On znao što Mu je bila namjera kad ga je stvorio.

S napretkom kvantne mehanike, počeli smo shvaćati da se događaji ne mogu predvidjeti s potpunom točnošću, nego da uvijek postoji određeni stupanj nesigurnosti. Ako se kome tako sviđa, može tu slučajnost pripisati Božjoj intervenciji. No bila bi to vrlo čudna vrsta interveniranja. Ne postoji dokaz da je usmjerena prema bilo kakvoj svrsi. Dapače, da jest, ne bi bila slučajna. U moderna vremena, uspješno smo uklonili treću mogućnost redefinirajući cilj znanosti. Naš cilj je formulirati niz zakona koji će nam

omogućiti da predviđamo događaje do mjere određene načelom neodređenosti.

Druga mogućnost, da postoji beskrajan niz sve doređenijih teorija, sukladna je svim našim dosadašnjim iskustvima. U mnogim prilikama mi jesmo povećali osjetljivost svojih mjerenja ili stvorili nove klase promatranja samo da bismo otkrili nove fenomene koji nisu bili predviđeni postojećom teorijom. Kako bismo ih razmatrali, morali smo razvijati još naprednije teorije. Neće stoga biti veliko iznenađenje ako otkrijemo da se naše postojeće velike jedinstvene teorije ruše kad ih provjerimo uz pomoć većih i moćnijih akceleratora čestica. Dapače, da nismo očekivali od njih da se sruše, ne bi imalo ni smisla trošiti sav taj novac na gradnju moćnijih strojeva.

Međutim, čini se da gravitacija može ponuditi granicu tom nizu »kutija u kutijama«. Ako imamo česticu čija je energija viša od onog što zovemo Planckovom energijom, 1019 GeV, njezina masa bila bi toliko koncentrirana da bi se otcijepila od ostatka svemira i stvorila malu crnu rupu. Tako, doista se čini da bi niz sve doređenijih teorija trebao imati neku granicu kako idemo prema većim i većim energijama. Trebala bi postojati neka konačna teorija svemira. Naravno, Planckova energija veoma je daleko od energija veličine oko jednog GeV, što je najviše što sada možemo proizvesti u laboratoriju. Kako bismo premostili taj jaz, trebao bi nam akcelerator čestica veći od Sunčeva sustava. Teško da bismo u sadašnjoj ekonomskoj klimi prikupili sredstva za takav akcelerator.

Međutim, vrlo rane faze svemira jesu područje u kojem su se takve energije morale javljati. Mislim da postoji prilična šansa da će nas proučavanje ranog svemira i zahtjevi matematičke konzistentnosti dovesti do cjelovite ujedinjujuće teorije, još do kraja stoljeća – naravno, uz pretpostavku da prije toga ne dignemo sami sebe u zrak.

Što bi značilo kad bismo zaista otkrili konačnu teoriju svemira?

Time bi bilo dovršeno dugačko i slavno poglavlje u povijesti naših napora da razumijemo svemir. Ali to bi i revolucioniralo način na koji svaki čovjek shvaća zakone koji upravljaju svemirom. U Newtonovo vrijeme obrazovanom je čovjeku bilo moguće zahvatiti ukupnost ljudskoga znanja, bar u glavnim crtama. Ali sve otada, put razvoja znanosti učinio je takvo što nemogućim. Teorije su se stalno mijenjale kako bi se mogle uskladiti s novim promatranjima. Nitko ih nije stigao dovoljno promozgati ili pojednostaviti tako da bi ih mogli razumjeti obični ljudi. Morate biti specijalist, pa čak i tada se možete samo nadati da ispravno zahvaćate određeni mali dio znanstvenih teorija.

Nadalje, brzina napretka bila je toliko velika da je ono što bi netko naučio u školi ili na fakultetu uvijek bilo pomalo zastarjelo. Samo nekolicina ljudi uspijeva biti u tijeku s graničnom crtom znanosti koja se stalno pomiče naprijed. A i oni tome moraju posvetiti čitavo svoje vrijeme i specijalizirati se u malom području. Ostatak ljudi malo zna o postignutim napretcima i o uzbuđenju koje su izazvali.

Prije 70 godina, da bi se Eddingtonu vjerovalo, bilo je dovoljno da dvoje ljudi razumije opću teoriju relativnosti. Danas je razumiju deseci tisuća sveučilišnih diplomaca, a mnogim milijunima ljudi ta je ideja u najmanju ruku bliska. Da se otkrije ujedinjujuća teorija, bilo bi samo pitanje vremena kad će ona jednako tako biti promozgana i pojednostavljena. Tada bi se mogla predavati u školi, barem u okvirnim crtama. Tada bismo svi mi bili u stanju imati neko razumijevanje zakona koji upravljaju svemirom i koji su zaslužni za naše postojanje.

Einstein je jednom postavio pitanje: »Koliko slobode je Bog imao kad je stvarao svemir?« Ako je prijedlog o bezgraničnosti točan, On nije imao nikakve slobode prilikom

odabira početnih uvjeta. Imao bi, naravno, i dalje slobodu izbora kad je riječ o zakonima kojima će se svemir pokoravati. Tu se, međutim, možda i ne bi imalo što puno birati. Sva je prilika da bi moguća bila samo jedna, ili posve mali broj cjelovitih ujedinjujućih teorija koje su samoodržive i koje dopuštaju postojanje inteligentnih bića.

Mi možemo postavljati pitanja o Božjoj prirodi čak i ako postoji samo jedna moguća ujedinjujuća teorija koja je naprosto niz pravila i jednadžbi. Što je to što unosi život u jednadžbe i čini ih prikladnim opisom svemira? Uobičajeni znanstveni pristup konstruiranja matematičkog modela ne može odgovoriti na pitanje zašto bi uopće postojao svemir koji se može opisati modelom. Zašto bi se svemir uopće trudio postojati? Je li ujedinjujuća teorija toliko jaka da samu sebe stvara? Ili ipak treba stvoritelja, i, ako da, ima li On ikakvog učinka na svemir osim što je odgovoran za njegovo postojanje? I tko je Njega stvorio?

Sve do sada, većina znanstvenika bila je previše zaokupljena razvitkom novih teorija koje opisuju svemir, da bi pitala zašto. S druge strane, ljudi čiji je posao pitati zašto – filozofi – nisu bili u stanju pratiti napredak znanstvenih teorija. U 18. stoljeću, filozofi su sveukupno ljudsko znanje, uključujući i znanost, smatrali svojim područjem. Raspravljali su o pitanjima kao što je: »Je li svemir imao početak?« No, u 19. i 20. stoljeću znanost je postala suviše tehnička i matematička za filozofe i za sve ostale, osim za malobrojne specijaliste. Filozofi su toliko suzili područje svojih istraživanja da je Wittgenstein, najslavniji filozof ovog stoljeća, rekao: »Jedini preostali zadatak filozofije je analiza jezika.« Kakav pad naniže u odnosu na velike tradicije filozofije od Aristotela do Kanta.

Ako ipak otkrijemo cjelovitu teoriju, ona bi s vremenom morala postati razumljiva u glavnim crtama svakome, ne samo nekolicini znanstvenika. Tada bismo svi bili u stanju

sudjelovati u diskusiji o tome zašto svemir postoji. Ako pronađemo odgovor na to pitanje, bit će to konačni trijumf ljudskog razuma. Jer tada bismo poznavali i Božji um.

Kazalo

antropični princip 80
antigravitacija 26
antimaterija 87
apsolutna nula 66
Aristotel 19, 24, 118
atomska bomba 76

Bardeen, Jim 63
Bell, laboratoriji 28
Bell, Jocelyn 52
Bentley, Richard 16
Bekenstein, Jacob 62–64
beskrajno vrijeme 48
beskrajni svemir 16
beskraj 16
bijeli patuljak 44–45
blistavost zvijezda 23
Bondi, Hermann 33
Born, Max 108
Božji grad 18

Carter, Brandon 51–63
Cerenkovo zračenje 69

Chandrasekhar
  Subrahmanyan 43–44
  Chandrasekharova
    granica 43–45
  teorija o hladnim
    zvijezdama 44–45
crne rupe 37 *vidi i*
  ponašanje primordijalnih
    crnih rupa 50
  Cygnus X-I 54–55
  detektiranje 53–54
  drugi zakon
    termodinamike 60–63
      i oblik 49
      i teorija svjetla 41
  entropija 60–64, 66
    i eksplozije 66–71
  gravitacijsku privlačnost
    41
  gravitacijske valove 49
    i Kerrov tip 51
  gubitka mase u 66–67
  razvoj matematičkih
    modela za 51
  rotacije 49–51, 64
  trenutačni pokazatelji
    zračenja 55
crveni pomak zvijezda
    25, 48
  kvazari 52
crvotočina 49
C, P, T 87–88
Cygnus X-I 54

čestična teorija svjetla 41

detektor mikrovalova 28
Dicke, Bob 29
Dopplerov efekt 25
  i mjerenje brzine 25
  i mjerenje širenja svemira 32
drugi zakon termodinamike 60–63

Eddington, Sir Arthur 43–45, 117
Einstein 26, 45, 107, 118
  slavna jednadžba 64
  opća relativnost 26, 82
eklipsa 13
emisija X-zraka 54
entropija 60–63

fazna tranzicija 82
Feynmanov prijedlog 87–88
fizika, zakoni 72
Friedmann, Alexander 27
Friedmannovi modeli 29–32, 76
  i teorija Velikog praska 33
  i prostorno-vremenski kontinuum 31, 33

galaktički oblaci plina 78
galaksija 23
  Dopplerovo mjerenje 32
  formacije novih 34
  Mliječna staza 23
  pobočno kretanje 35
  rotacija 24
  slučajna ubrzanja 36
Galilei, Galileo 14
  Katolička crkva i 75
gama-zrake 68–69
Gamow, George 29
gibanje, matematička analiza 15
Gold, Thomas 33
Go Between, The (»Prolaz između«) 87
granični uvjeti svemira 91–92
gravitacijski valovi 49
gravitacija 15–16
  crnih rupa 48, 83
  učinak na svjetlo 41–42
  i Friedmannove pretpostavke 30–31
Green, Mike 112
gustoća
  bjelog patuljka 44
  svemira 32
Guth, Alan 81–84

Hartle, Jim 90
Hartley, L. P. 87
Hawking, Lucy 59
helij 42, 78
Hewish, Anthony 52
hipoteza o kozmičkoj cenzuri 49
Hoyle, Fred 33
Hubble, Edwin 19
  i galaksije 23
  i udaljenosti tijela 23, 25–26
  Friedmannove pretpostavke 27
horizont događaja 62–63, 66
  entropija 63–64
  stvaranje zraka svjetlosti 59
  svojstvo neopadanja 60

imaginarno vrijeme 87, 91
inflatorni model 81–83, 92
  eksponencijalno širenje 81
  fazna tranzicija 82, 84–85
  mjehurići 84–85
  početna temperatura 82
  problemi s 84–86
Israel, Werner 49

jabuka (i Newton) 15
jake sile 108
  teorija struna 111
Jupiter 14
  Galileovo promatranje 15

Kant, Immanuel 118
Katolička crkva 33
  i Galileo Galilei 75
kemijski elementi i spektar svjetla 24–25
Kerr, Roy 50
Khalatnikov, Isaac 35–36
klasična teorija 86–87
  i opća relativnost 108
  gravitacija 88
Knjiga postanka 18
Kopernik, Nikola 14
kozmologije, religijske 18
kozmološka konstanta 26, 82, 84
kozmološki model iz 1. stoljeća 14
kvantna mehanika 41
  antičestice u 109
  Einstein 107
    i opća relativnost 70–72
  i načelo neodređenosti 63, 72, 107–108
  kvantna gravitacija 85–88, 90
  kvantni gravitacijski efekti 86, 108–109
  virtualne čestice 109
kvantna teorija 86
  gravitacije 88–89, 91
  i teoremi singularnosti 91
kvazar 52–55

Laplace, Marquis de 42
ledeno doba 18
Lifshitz, Evgenii 35–36
Linde, Andrei 85–86
luminiscencija zvijezda 23

magnetska privlačnost i orbite planeta 15
Mars 14
Merkur 14
Michell, John 41
  i otkrivanje crnih rupa 28
MIT 81
Mount Palomar, opservatorij 52
Murphyjev zakon 88

načelo neodređenosti kvantne mehanike 63, 72, 107–108
neutronska zvijezda 44
  pulsar 53
  u vrućem modelu Velikog praska 78
Newton 15, 42
Nobelova nagrada
  za otkriće pozadinskog zračenja 29
  za teoriju hladnih zvijezda 45
  objedinjujuća sila 82, 108

Olbers, Heinrich 18

opća relativnost 27
i gravitacijski efekt na svjetlo 42
i kvantna mehanika 70–72, 108
i pitanja o vrućem modelu Velikog praska 80
kozmološka konstanta u teoriji 26, 82, 84
teorem o singularnosti 86, 91
i teorija stabilnog stanja 34
Oppenheimer, Robert 46

Paulijevo načelo isključenja 43
neutronske zvijezde 44
Peebles, Jim 29
Penrose, Roger 36–37, 48, 59
i svojstvo neopadanja horizonta događaja 60
Penzias, Arno 28–29
i model vrućeg Velikog praska 77
Philosophical Transactions of the Royal Society of London 41
Planckova energija 116
Planckov kvantni princip 68–69
planeti, orbite 13
Keplerova teorija 15
Newtonova teorija 15
Pluton 68, 69
Porter, Neil 70
pozitivna energija tvari 83
primordijalne crne rupe 67
gama-zrake 68–69
i zračenje kao kod vrućega tijela 71
moguća udaljenost od 69
potraga za 67–70
Principia Mathematica Naturalis Causae 15
prizma 24
psihološka strijela 90–91
Ptolomej 14–16, 24
pulsar 53
plavi pomak zvijezda 26
povijest svemira u realnom vremenu 90
pozadinsko zračenje 28–29
i model vrućeg Velikog praska 77
Nobelova nagrada za otkriće temperature pozadinskog zračenja 29, 66
pozitivna energija materije u 83–84
pretpostavke o pozadinskom zračenju 27–31
projekt atomske bombe 46
prostorno-vremenske dimenzije 112

radar, razvitak 33
radijalni valovi 25
razdoblja katastrofa 19
renormalizacija 109
Robertson, Howard 30
Robinson, David 51
Ryle, Martin 34

Saturn 14
Scherk, Joël 111
Schmidt, Maarten 52
Schwarz, John 111–112
Schwarzschild, Karl 50–51

Schwarzschildovo rješenje 50
selekcijsko načelo 80
singularnost i teorija Velikog praska 33–37, 48–49, 71–72, 80, 86–87, 91
Sjevernjača 13
slaba sila 108
smjer vremena
  i C, P, T 87–88
  i granični uvjeti svemira 90–91
  i psihološka strijela 90–91
  i termodinamička strijela 89–90, 92
  strijele vremena 88–89
spektar svjetla 24–25
  kemijski elementi 24–25
  temperatura 24
stadij 13
Starobinsky, Alexander 63
Sternberg Astronomical Institute 85
strijele vremena 88, 91, 103
  psihološke strijele 90–91
  obrnute strijele 92, 104
  termodinamičke strijele 89–90, 92
stvaranje zvijezda 42
superohlađena voda 82
sv. Augustin 18, 115

svemir
  beskrajni statični model 17, 19
  koji se širi 19
  gustoća u odnosu na 31–32
  Hubbleovi eksperimenti 25–26
  i prijedlog o bezgraničnosti 91–92
  i svjetlosni konusi 46–47
  i teorija o stvaranju 20
  model 11
  pozadinsko zračenje u 28–29
  promotrivi 14
  prosječna gustoća 31
  rani modeli 13–18
    Aristotel 13
    Kopernik, Nikola 14
    Galilei, Galileo 14
    Kepler, Johannes 15
    Ptolomej 14
  teorija Velikog praska 19, 33–35
svijet crte 110
svijet plahte 110
svjetlo, teorije o 41

Taylor, John G. 71
teorija o hladnim zvijezdama 44–46
teorija relativnosti 27
  apsolutno vrijeme 47
  i termodinamička strijela 89–90, 92
teorija stabilnog stanja 33
  Cambridge, eksperimenti 34
teorija struna 111–115
teorija stvaranja 20
teorija Velikog praska 19–20
  Katolička crkva 33
  i Friedmannovi modeli 35
  i obrnuto vrijeme crnih rupa 37
Thorne, Kip 54
tvar, stalno stvaranje 33–34

udaljenost među zvijezdama 23–24
ujedinjujuća teorija 82, 108
  mogućnost 115
univerzalna gravitacija
  zakon o 15
uvjet bezgraničnosti 89–90
  i stvarno vrijeme 92
  moguće povijesti pod uvjetom bezgraničnosti 90–91
  obrnuto vrijeme 103

valna teorija svjetla 41
Vatikan 75, 89
velike ujedinjujuće teorije 108
Venera 14
voda, simetrija 82
vodik 42, 77
  pretvorba u helij 78
vremensko-prostorni
  crne rupe u 36, 46–47
  euklidski model 87
  kontinuum 31
  kvantna gravitacija 88–90
  svjetlo 46–47
  tekstura 33, 92
  teorija relativnosti 47
  teorija struna 112
  uvjet bezgraničnosti 89
  zakrivljenost 108–109
  zamišljene teorije o vrijednostima 87
vrijeme
  početak 33
  smjer 87–91
vrući model Velikog praska 75–84
  galaktički oblaci plina 78
  helij 77
  hlađenje svemira 76–78
  neutronske zvijezde 78–79
  početna temperatura svemira 76
  sadržaj svemira 76

Walker, Arthur 30
Weekes, Trevor 70
Wheeler, John 41, 50
  teška voda, teorija o 55
Wilson, Robert 28
  i vrući model Velikog praska 77
Wittgenstein, Ludwig 118

Zeldovich, Yakov 63
Zemlja
  kao središte svemira 13–14, 24
  oblik 13
  obujam 13
zvijezde stajaćice 14–15
znanstvena teorija kao matematički model 91
zvijezda, blistavost 23
zvijezda, životni ciklus 42–43
  identificirani tipovi 24
  konačni broj 16
  sastav 42

Hawking nas vodi na fascinantno putovanje u kojem otkrivamo po kao i naše n

Stephen Hawking predstavlj predavanja koja pokrivaju sv rupa i teorije struna. Ona po njegova uma, nego i karakte O svom istraživanju crnih ru od desetljeća, rekao je: »To j mačku u podrumu punom uc

Hawking počinje s prikazom Aristotelove tvrdnje da je Zemlja okrugla do Hubbleova otkrića, oko 2000 godina kasnije, da se svemir širi. Koristeći to kao polazišnu točku, on istražuje domete moderne fizike, uključujući teorije o podrijetlu svemira (drugim riječima, Veliki prasak), prirodu crnih rupa i prostor-vremena. Konačno, postavlja pitanja na koja moderna fizika još nije odgovorila, posebice ono o tome kako spojiti sve djelomične teorije u »ujedinjujuću teoriju svega«. »Nađemo li odgovor na to pitanje«, smatra on, »bit će to konačan trijumf ljudskoga razuma.«

Veliki popularizator znanosti i briljantan znanstvenik, Hawking vjeruje kako prednosti teorijske znanosti trebaju biti »načelno razumljive svakome, a ne samo nekolicini znanstvenika«. Ovo je knjiga za svakoga tko je ikada pogledao u zvjezdano nebo i zapitao se čega tamo ima i kako je ono uopće nastalo.

STEPHEN HAWKING **TEORIJA SV**

v|b|z

STEPHEN HAWKING **TEORIJA SVEGA**

120,00 kn

v|b|z STRUČNO POPULARNA
www.vbz.hr